

**Beitrag zur systematischen Auslegung von thermoplastischen Spritzgießbauteilen aus glaskugelgefülltem Polyamid mithilfe von lasergesinterten Prototypen**

**Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Horn**

aus Hildesheim

genehmigt von der

Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften  
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

08. November 2016



Dekan:

Prof. Dr. rer. nat. Winfried Daum

Vorsitzende/Vorsitzender der Promotionskommission:

Prof. Dr.-Ing. Heinz Palkowski

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel

**Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand von 2011 bis 2016 im Rahmen meines Promotionsvorhabens am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik (PuK) der TU Clausthal. In dieser Zeit war ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktion und angewandten Maschinenbau (IKAM) der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften tätig.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann, ehemaliger Institutsdirektor des Instituts für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik der TU Clausthal und jetzigen Inhaber der Niedersachsenprofessur Faserverbundwerkstoffe am PuK, für die hervorragende Betreuung während meines Promotionsvorhabens sowie die Übernahme der Rolle des ersten Gutachters. Professor Ziegmann hat mir nicht nur die Möglichkeit gegeben, mich intensiv mit wissenschaftlichen Fragestellungen auseinanderzusetzen, sondern hat mich in dieser Zeit sowohl fachlich als auch persönlich begleitet. In vielen gemeinsamen Gesprächen haben wir intensiv verschiedenste Zusammenhänge erörtert und den Fortschritt meiner Arbeit diskutiert.

Herrn Professor Dr.-Ing. Armin Lohrengel, Institutsdirektor des Instituts für Maschinenwesen der TU Clausthal, danke ich für das Interesse an meiner Arbeit, die gemeinsamen Diskussionen und die Übernahme der Rolle des zweiten Gutachters.

Darüber hinaus gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Sven Lippardt, Prüfungsausschussvorsitzender und Prodekan sowie Mitglied des Instituts für Konstruktion und angewandten Maschinenbau der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, mein besonderer Dank. In meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter hat er mir die notwendigen Rahmenbedingungen für meine Forschungsarbeit bereitgestellt und mir entsprechende Freiräume eingeräumt, um mich intensiv mit meinem Thema zu beschäftigen. Durch das Vertrauen, das er mir und meiner Arbeit stets entgegengebracht hat, bekräftigte er mich auf meinem Weg.

Mein besonderer Dank geht auch an Herrn Professor Achim Schmiemann, Leiter des Instituts für Recycling der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften am Standort Wolfsburg und seine Mitarbeiter. Namentlich möchte ich an dieser Stelle Till Quabeck und Olaf Jung ganz besonders herausheben, die mir die benötigten Maschinen und Anlagen im Technikum stets mit großem Enthusiasmus erklärt und mir die Benutzung auf sehr direktem Wege ermöglicht haben. Beiden Kollegen möchte ich meinen herzlichen Dank aussprechen.

An dieser Stelle möchte ich mich auch ganz herzlich bei meinen Kollegen Carsten Oppermann, Rolf Sabbath und Dirk Schölzel aus dem interdisziplinären Qualitätszirkel des Instituts für Konstruktion und angewandten Maschinenbau der Hochschule Ostfalia für die Unterstützung bei meiner Arbeit und die immer gute Zusammenarbeit bedanken. Ich empfand unsere intensive Zusammenarbeit als wahre Bereicherung und werde noch lange an unsere gemeinsame Zeit zurückdenken.

Auch meinen restlichen Kollegen am Institut und in der Fakultät Maschinenbau der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften sowie den Mitarbeitern des Instituts für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik der TU Clausthal, die mir stets hilfsbereit zur Seite und als interessierte Diskussionspartner zur Verfügung standen, gilt mein Dank. In diesen Dank möchte ich ebenfalls die zahlreichen Hilfskräfte, Studien- und Abschlussarbeiter einschließen, die mich in meiner Zeit am Institut tatkräftig unterstützt haben.

Den Mitarbeitern der Zentralen Betriebswerkstatt (ZBW) der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, die mich unter Leitung von Herrn Horst Eidam und Herrn Christoph Sorge tatkräftig bei der

Fertigung und dem Aufbau zahlreicher Laborprüfstände und Spritzgießwerkzeuge unterstützt haben, möchte ich an dieser Stelle ebenfalls danken. Ohne sie wäre die Durchführung meiner Forschungsarbeit nicht möglich gewesen.

Zu guter Letzt gilt mein ganz besonderer Dank sowohl meiner Lebensgefährtin Jenna Hoffmann als auch meiner Familie. Sie haben mich in schwierigen Situationen wieder aufgebaut und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben. Insbesondere meine Lebensgefährtin, die mich in der vergangen Zeit meistens mit meinem Schreibtisch bzw. meinem Büro teilen musste, hat mich durch ihre Unterstützung motiviert und inspiriert.

Ein Teil der Ergebnisse, die in dieser Arbeit dargestellt werden, wurden im Rahmen eines, durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten, Forschungsvorhabens erarbeitet. Das Vorhaben wurde in der Förderlinie „IngenieurNachwuchs“ im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 17N2211 durchgeführt.

### **Kurzzusammenfassung**

In der vorliegenden Arbeit wird anhand eines wissenschaftlichen Ansatzes dargestellt, dass durch die konsequente Einbindung von lasergesinterten Prototypen in den Entwicklungsprozess von Spritzgießbauteilen aus glaskugelgefülltem Polyamid 12 (PA 12 GK) ein signifikanter Mehrwert erzielt werden kann. Insbesondere wird erläutert, wie mit Bauteilnachweisen an lasergesinterten Prototypen Ergebnisse erzielt werden können, die sowohl die Absicherung von Simulationsergebnissen ermöglichen als auch quantitative Rückschlüsse auf das Verhalten des späteren Spritzgießbauteils zulassen.

Die Gegenüberstellung der Fertigungsverfahren Lasersintern und Spritzgießen zu Beginn der Arbeit zeigt, dass davon auszugehen ist, dass die mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten und spritzgegossenen Kunststoffbauteilen, die aus dem gleichen Werkstoff gefertigt werden, voneinander abweichen. Insbesondere das Vorhandensein von Poren und nicht aufgeschmolzenen Partikeln im Inneren von lasergesinterten Bauteilen hat signifikanten Einfluss auf deren mechanische Eigenschaften. Im Rahmen einer grundlegenden Materialcharakterisierung werden die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem sowie spritzgegossenem PA 12 GK systematisch miteinander verglichen und der quantitative Einfluss ausgewählter kunststofftypischer Faktoren diskutiert. Im weiteren Verlauf wird dargestellt, welche Art von Materialmodell und welches Fließkriterium benötigt werden, um das Kurzzeitverhalten von lasergesinterten Bauteilen korrekt in der Strukturanalyse abzubilden. Die systematische Auswertung der Ergebnisse belegt, dass das Kraft-Verformungs-Verhalten von flächigen Lasersinterbauteilen unter bestimmten Voraussetzungen sehr gut mithilfe eines elastisch-plastischen Materialmodells und des isotropen von Mises-Fließkriteriums abgebildet werden kann. Weitere Untersuchungen zeigen jedoch, dass für die Simulation des Bauteilverhaltens von dreidimensionalen und mehrachsig belasteten Bauteilen ein Fließkriterium benötigt wird, das die transversal isotropen Materialeigenschaften von lasergesintertem PA 12 GK vollständig abbilden kann. Die durchgeführten Bauteilnachweise belegen, dass das Hill-Fließkriterium für diesen Anwendungsfall sehr gut geeignet ist. Insgesamt wird deutlich, dass Bauteilversuche an lasergesinterten Prototypen sehr gut geeignet sind, um zu überprüfen, ob das Kurzzeit-Kraft-Verformungs-Verhalten eines Kunststoffbauteils in der Struktursimulation korrekt abgebildet wird.

Die wissenschaftliche Analyse des quantitativen Zusammenhangs zwischen den mechanischen Eigenschaften von Bauteilen aus lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK zeigt, dass sowohl die Steifigkeit als auch die Festigkeit von Spritzgießbauteilen aus glaskugelgefüllten PA 12 GK wesentlich größer sind als die jeweiligen Kennwerte von lasergesinterten Bauteilen. Die durchgeführten Bauteilnachweise belegen, dass das Bruchdrehmoment eines Spritzgießbauteils mithilfe eines konstanten Faktors, der aus der Zugfestigkeit der jeweiligen Materialien ermittelt werden kann, mit sehr guter Übereinstimmung anhand der Drehmomentbelastbarkeit des lasergesinterten Prototyps berechnet werden kann. Die Gültigkeit des ermittelten Zusammenhangs wird für zwei Spritzgießwerkstoffe bewiesen.

Die durchgeführte wissenschaftliche Betrachtung des quantitativen Zusammenhangs zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 belegt, dass die mechanische Belastbarkeit und das Kraft-Verformungs-Verhalten eines Spritzgießbauteils bereits in der Konzeptphase durch die geschickte Kombination von Bauteilnachweisen an lasergesinterten Prototypen und durch den gezielten Einsatz von Struktursimulationen sehr gut vorausbestimmt werden kann. Die Absicherung der Belastbarkeit von Bauteilkonzepten, noch bevor die Serienwerkzeuge gefertigt wurden, vergrößert die Sicherheit bei der Bauteilauslegung erheblich, wodurch wichtige Entscheidungen im Entwicklungsprozess, frühzeitig und vor allem endgültig getroffen werden können.



**Abstract**

In the present PhD thesis is shown, that by means of a scientific approach a significant added value can be achieved by consistently integrating laser-sintered prototypes into the development process of injection-molded parts, which are made out of glass bubble filled Polyamide 12 (PA 12 GB). Especially, it will be explained how test results can be achieved by using component evidences on laser-sintered prototypes, which allow on the one hand the assurance of simulation results and on the other hand the quantitative conclusions on the behavior of the future injection-molded component.

The comparison of the manufacturing processes selective laser sintering and injection molding at the beginning of this thesis presents, that the mechanical properties of laser-sintered and injection-molded plastic components will be different, although they are made out of the same plastic raw material. In particular, the presence of pores and non-melted particles inside of laser-sintered components has a significant impact on their mechanical properties. Within the scope of a basic material characterization, the mechanical properties of laser-sintered and injection-molded PA 12 GB will be systematically compared. In addition the quantitative impact of typical plastic influence factors will be discussed. In the following course of this PhD thesis, it will be shown which type of material model and which yield criterion are required in order to correctly map the short term behavior of laser-sintered components in the structure analysis. The scientific analysis of the results shows that under certain conditions the force-deformation behavior of planar laser-sintered components can be reproduced very well by means of an elastic-plastic material model and the isotropic von Mises yield criterion. Furthermore additional studies in this doctoral thesis show that a yield criterion, which can completely represent the transversal isotropic material properties of laser-sintered PA 12 GB is required to simulate the component behavior of three-dimensional and multi-axial loaded components. The conducted component tests prove that the Hill yield criterion is very suitable for this application. Overall it becomes clear that component tests on laser-sintered prototypes are very suitable for checking whether the short-term force-deformation behavior of a plastic component is correctly reproduced in the structural simulation.

The scientific analysis of the quantitative relationship between the mechanical properties of polymer parts, which are made out of laser-sintered and injection-molded PA 12 GB, proves, that the rigidity and the strength of injection-molded components made out of glass bubble filled PA 12 are significantly greater than the respective characteristic values of laser-sintered components. Component tests prove that the fracture torque of an injection-molded part can be calculated by a constant conversion factor with a very good accordance by means of the torque load ability of a laser-sintered prototype, which has the same geometry as the future injection-molded component. The required conversion factor can be determined with the aid of the tensile strength of the respective materials. The validity of the ascertained relationship is proved for two injection molding materials in the presented PhD thesis.

The scientific study of the quantitative relationship between the mechanical properties of laser-sintered and injection-molded PA 12 GB demonstrates, that the mechanical strength and the force-deformation behavior of an injection-molded component can already be predicted very well in the concept phase by using a skillful combination of structural simulations and component tests on laser-sintered prototypes. Through the safeguarding of the mechanical load capacity of part drafts of injection-molded components during the concept phase, even before the injection molding tool has been produced, a considerable increase of the safety can be achieved. Whereby important decisions in the development process of a injection-molded part can be made early, and also definitively.



**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Aufbau der vorliegenden Arbeit.....	3
1.2	Systematischer Lösungsansatz.....	4
1.3	Beispielbauteil.....	7
<b>2</b>	<b>Lasergesinterte Prototypen im Entwicklungsprozess von Spritzgießbauteilen .....</b>	<b>8</b>
2.1	Prototyparten .....	8
2.2	Prototypfertigung.....	9
2.2.1	Einordnung der generativen Fertigungsverfahren.....	9
2.2.2	Verfahrensvielfalt der generativen Fertigungsverfahren.....	11
2.3	Lasersintern/Selektives Lasersintern .....	13
2.3.1	Charakterisierung Lasersinterprozess .....	14
2.4	Prozessvergleich Lasersintern und Spritzgießen.....	15
2.5	Charakterisierung des Werkstoffverhaltens von Thermoplasten.....	16
2.5.1	Temperatur .....	17
2.5.2	Wasseraufnahme.....	21
2.5.3	Belastungszustand .....	22
2.6	Charakterisierung der Eigenschaften von Lasersinter- und Spritzgießbauteilen.....	26
2.6.1	Nicht aufgeschmolzene Partikel in lasergesinterten Bauteilen.....	27
2.6.2	Poren in lasergesinterten Bauteilen.....	28
2.6.3	Mechanische Eigenschaften im Vergleich .....	28
2.6.4	Spannungs-Dehnungs-Verhalten .....	30
<b>3</b>	<b>Charakterisierung der Einflussgrößen des Lasersinterprozesses.....</b>	<b>33</b>
3.1	Bediener und Sinteranlage.....	34
3.2	Geometriedaten .....	34
3.3	Bauteil .....	36
3.3.1	Orientierung.....	37
3.3.2	Wandstärke.....	37
3.3.3	Position im Bauraum .....	38
3.3.4	Skalierungsfaktoren.....	38
3.4	Sinterprozess .....	39
3.4.1	Laser.....	40
3.4.2	Belichtung und Belichtungsparameter .....	40



3.4.3	Scanstrategie.....	45
3.4.4	Bauraumtemperatur .....	46
3.4.5	Umgebung .....	48
3.4.6	Ende des Bauprozesses .....	48
3.5	Werkstoffauswahl.....	49
3.5.1	Thermische Eigenschaften.....	50
3.5.2	Rheologische Eigenschaften .....	51
3.5.3	Optische Eigenschaften.....	51
3.5.4	Alterung.....	53
3.5.5	Aktuell verwendete Sinterpolyamide.....	56
3.6	Pulverspezifische Eigenschaften.....	58
3.6.1	Partikel.....	58
3.6.2	Agglomeration von Sinterpulver.....	59
<b>4</b>	<b>Charakterisierung der Randbedingungen.....</b>	<b>60</b>
4.1	Herstellungsprozess.....	60
4.2	Werkstoffe.....	61
4.2.1	Polyamid.....	61
4.2.2	Verfügbare Materialdatenblätter .....	63
4.3	Bezeichnung und Orientierung der Probestäbe .....	66
4.3.1	Sinterproben .....	66
4.3.2	Spritzgießproben.....	67
4.4	Vorbereitung/Lagerung der Proben .....	68
4.5	Einachsiger Zugversuch.....	68
4.5.1	Kennwerte des einachsigen Zugversuchs.....	69
4.5.2	Poisson-Konstante .....	69
4.5.3	Mikroschädigungsgrenzen .....	70
4.5.4	Randbedingungen/Parameter .....	70
<b>5</b>	<b>Systematische Werkstoffcharakterisierung.....</b>	<b>72</b>
5.1	Charakterisierung des Einflusses der Glaskugeln .....	72
5.1.1	Wirkung von isometrischen Füllstoffen.....	73
5.1.2	Einfluss der Glaskugeln auf den Zug-E-Modul.....	75
5.1.3	Einfluss der Glaskugeln auf die Zugfestigkeit .....	76
5.1.4	Einfluss der Glaskugeln auf die Streckdehnung/die Dehnung bei Zugfestigkeit.....	80
5.1.5	Bewertung der Untersuchung des Einflusses der Glaskugeln .....	80

5.2	Charakterisierung des Einflusses der Ausrichtung im Herstellungsprozess.....	82
5.2.1	Charakterisierung der anisotropen Eigenschaften von Lasersinterbauteilen .....	83
5.2.2	Charakterisierung der anisotropen Eigenschaften von Spritzgießbauteilen .....	84
5.2.3	Systematik zur Untersuchung der anisotropen Eigenschaften.....	86
5.2.4	Mechanische Eigenschaften von Sinterpolyamiden in der XY-Ebene .....	87
5.2.5	Mechanische Eigenschaften von Sinterpolyamiden im dreidimensionalen Raum .....	92
5.2.6	Bewertung der Untersuchung der Anisotropie von Sinterpolyamiden .....	101
5.2.7	Vergleich der Anisotropie von glaskugelgefüllten Sinter- und Spritzgusspolyamiden ....	102
5.3	Charakterisierung des Einflusses der Wasseraufnahme .....	105
5.3.1	Einfluss der Wasseraufnahme auf den Zug-E-Modul .....	107
5.3.2	Einfluss der Wasseraufnahme auf die Zugfestigkeit.....	108
5.3.3	Einfluss der Wasseraufnahme auf die Dehnung bei Zugfestigkeit.....	109
5.3.4	Stärkere Ausprägung des Wassereinflusses bei glaskugelgefülltem Sinterpolyamid .....	109
5.3.5	Auswirkung des Einflusses der erhöhten Wasseraufnahme des Spritzgussmaterials .....	118
5.3.6	Bewertung der Untersuchung des Einflusses der Wasseraufnahme .....	119
5.4	Charakterisierung des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit .....	121
5.4.1	Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Zugfestigkeit.....	122
5.4.2	Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Dehnung bei Zugfestigkeit .....	123
5.4.3	Bewertung der Untersuchung des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit.....	124
5.5	Charakterisierung des Einflusses der Dicke des Probestabs .....	126
5.5.1	Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Probekörperdicke .....	126
5.5.2	Einfluss der Dicke des Probestabs auf den Zug-E-Modul.....	128
5.5.3	Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Zugfestigkeit .....	130
5.5.4	Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Dehnung bei Zugfestigkeit .....	131
5.5.5	Bewertung der Untersuchung des Einflusses der Dicke des Probestabs .....	132
5.6	Charakterisierung des Einflusses der Charge und des Sinterexperten.....	133
5.6.1	Einfluss der Charge/des Sinterexperten auf den Zug-E-Modul.....	133
5.6.2	Einfluss der Charge/des Sinterexperten auf die Zugfestigkeit .....	134
5.6.3	Einfluss der Charge/des Sinterexperten auf die Dehnung bei Zugfestigkeit .....	135
5.6.4	Bewertung der Untersuchung des Einflusses der Charge und des Sinterexperten.....	135
5.7	Bedeutung der Ergebnisse der systematischen Werkstoffcharakterisierung .....	137
<b>6</b>	<b>Simulation des Kurzzeitverhaltens von Lasersinterbauteilen.....</b>	<b>140</b>
6.1	Grundlagen der Modellbildung.....	140
6.2	Charakterisierung und Auswahl von Materialmodellen für thermoplastische Kunststoffe .....	140

6.2.1	Wahl des Materialmodells zur Simulation von Kunststoffbauteilen .....	141
6.2.2	Materialverhalten und Materialmodelle .....	141
6.2.3	Wahre Spannungen und Dehnungen .....	145
6.3	Äquipotenzialbedingungen .....	146
6.3.1	Fließkriterien .....	147
6.3.2	Von Mises-Fließkriterium.....	148
6.3.3	Hill-Fließkriterium.....	149
6.4	Charakterisierung der Vorgehensweise zur Entwicklung des Beispielbauteils .....	151
6.4.1	Funktionsprototyp.....	151
6.4.2	Technischer Prototyp/Serienteil.....	152
6.5	Charakterisierung der Randbedingungen des Bauteilversuchs.....	153
6.6	Struktursimulation und Bauteilversuch.....	154
6.6.1	Isotropes Fließkriterium.....	154
6.6.2	Anisotropes Fließkriterium .....	158
6.7	Bewertung der Versuchsergebnisse zur Simulation des Bauteilverhaltens .....	162
<b>7</b>	<b>Analyse des quantitativen Zusammenhangs.....</b>	<b>163</b>
7.1	Quantitativer Zusammenhang im Zugversuch .....	163
7.1.1	Quantitativer Zusammenhang Zug-E-Modul .....	164
7.1.2	Quantitativer Zusammenhang Zugfestigkeit.....	168
7.1.3	Quantitativer Zusammenhang Dehnung bei Zugfestigkeit.....	170
7.1.4	Bewertung des quantitativen Zusammenhangs im Zugversuch.....	172
7.2	Quantitativer Zusammenhang im Bauteilversuch .....	173
7.2.1	Drehmoment-Verdrehwinkel-Verhalten des Funktionselements .....	173
7.2.2	Quantitativer Zusammenhang Bruchdrehmoment .....	174
7.2.3	Verifikation des quantitativen Zusammenhangs des Bruchdrehmoments .....	177
7.2.4	Quantitativer Zusammenhang Bauteilsteifigkeit.....	180
7.2.5	Bewertung des quantitativen Zusammenhangs im Bauteilversuch .....	183
7.3	Quantitative Absicherung durch Struktursimulation.....	183
7.3.1	Materialmodell.....	183
7.3.2	Simulation des Bauteilverhaltens.....	184
7.3.3	Simulation und Bauteilversuch im direkten Vergleich.....	185
7.3.4	Bewertung der quantitativen Absicherung durch Struktursimulation.....	186
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>188</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>194</b>

---

<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>203</b>
10.1	Abkürzungsverzeichnis .....	203
10.2	Formelzeichenverzeichnis .....	205
10.3	Anhang zu Kapitel 5 .....	210
10.3.1	Anhang zu Abschnitt 5.1 .....	210
10.3.2	Anhang zu Abschnitt 5.2 .....	211
10.3.3	Anhang zu Abschnitt 5.3 .....	212
10.3.4	Anhang zu Abschnitt 5.4 .....	216
10.3.5	Anhang zu Abschnitt 5.5 .....	221
10.4	Anhang zu Kapitel 7 .....	227
10.4.1	Anhang zu Abschnitt 7.2 .....	227
10.4.2	Anhang zu Abschnitt 7.3 .....	230



## 1 Einleitung

Thermoplastische Kunststoffe, die mithilfe des Spritzgießverfahrens verarbeitet werden, eignen sich besonders für die Herstellung von Großserienprodukten. Auf diese Weise ist es möglich, komplex geformte Bauteile in nur einem Produktionsschritt herzustellen. Durch die gezielte Ausnutzung der Vorteile des Spritzgießverfahrens können kostengünstige Bauteile mit hoher Funktionsintegration entwickelt werden.

Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften haben thermoplastische Kunststoffe gewisse Vorteile gegenüber metallischen Werkstoffen. Sie zeichnen sich vor allem durch ihre Dehnbarkeit, die geringe Dichte, eine niedrige Verarbeitungstemperatur und ihre Korrosionsbeständigkeit aus. Das Gesamtgewicht einer Baugruppe kann erheblich verringert werden, wenn möglichst viele Metallteile durch Kunststoffteile substituiert werden. Dies setzt voraus, dass die Kunststoffteile alle geforderten Funktionen vollständig übernehmen. Als Nachteil gegenüber Metallen sind die geringe Steifigkeit, Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit sowie das Ermüdungsverhalten der Thermoplaste zu nennen. Durch den Einsatz von Verstärkungsfasern, die in eine thermoplastische Matrix eingebettet werden, können die mechanischen Kennwerte jedoch signifikant gesteigert werden. Gut geeignet sind Glas- und Kohlenstofffasern. Auch mit Naturfasern, wie zum Beispiel Flachs- oder Hanffasern, lassen sich Verstärkungseffekte erzielen.

Aufgrund des temperaturabhängigen, nicht linear viskoelastischen Materialverhaltens von Thermoplasten ist die korrekte Dimensionierung eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung von Kunststoffspritzgießteilen. Oftmals werden Bauteile mit stark vereinfacht ermittelten Dimensionierungskennwerten oder mithilfe von Struktursimulationen, denen Materialmodelle zugrunde liegen, die das reale Werkstoffverhalten nur unzureichend abbilden können, ausgelegt. Die Wahl des Materialmodells ist bei der Simulation der Eigenschaften von Kunststoffbauteilen allerdings von entscheidender Bedeutung, da die Erfassung des nicht linear viskoelastischen Materialverhaltens unter anderem die Berücksichtigung der Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Belastungsgeschwindigkeit, der Belastungsdauer und der Belastungsart erfordert [1]. Zusätzlich wird die Bauteildimensionierung von thermoplastischen Spritzgießteilen durch den Einfluss des Fertigungsverfahrens auf die Eigenschaften des produzierten Bauteils erschwert. Durch den Spritzgießprozess kann es zu Bindenähten, Eigenspannungen, Bauteilverzug sowie lokal unterschiedlichen Füllstoff- und/oder Molekülorientierungen kommen [2]. Unzulänglichkeiten bei der Bauteilauslegung führen zu einer Über- oder Unterdimensionierung, wobei weder das eine noch das andere erwünscht ist. Überdimensionierte Teile nutzen das Potenzial des verwendeten Werkstoffs nicht vollständig aus. Aufgrund des zu hohen Materialeinsatzes sind sie schwerer und teurer als korrekt dimensionierte Bauteile. Unterdimensionierte Bauteile können den eingeleiteten Belastungen nicht standhalten und versagen sofort oder vor dem Erreichen der geforderten Lebensdauer. Ob ein Spritzgießbauteil richtig ausgelegt ist, zeigt sich in der Regel erst am Ende des Entwicklungsprozesses, nachdem die kostenintensiven Serienwerkzeuge gefertigt und erste Versuche mit Serienteilen durchgeführt wurden. Als Folge einer fehlerhaften Dimensionierung müssen Spritzgießwerkzeuge sehr häufig geändert oder sogar neu gefertigt werden, bis die finale Konstruktion und Qualität erreicht sind [3].

Heutzutage besteht die Herausforderung darin, immer komplexere Produkte immer schneller und effizienter zu entwickeln, da die Produktentstehungszeit (Time-to-Market) den Markterfolg eines Produkts erheblich beeinflusst. Für die Verkürzung der Time-to-Market (TTM) ist es wichtig, verbindliche Entscheidungen frühzeitig zu treffen. Bereits zum Ende der Konzeptphase sind ca. 75 % der Gesamtkosten, die später unweigerlich anfallen, fixiert. Hinzu kommt, dass gleiche Änderungen um eine Zehnerpotenz teurer sind, wenn sie eine Produktentwicklungsstufe später anfallen. Es wird deutlich, dass es besonders wichtig ist, Entscheidungen nicht nur möglichst frühzeitig, sondern auch verbindlich zu treffen. Die meisten

Entscheidungen im Entwicklungsprozess sind in besonderem Maße davon abhängig, ob konstruktive Details korrekt eingeschätzt und abgesichert sind [4].

Eine Möglichkeit zur Absicherung von Bauteilkonzepten ist der Einsatz von Prototypen. In der Technik wird unter dem Begriff Prototyp die erste physische Umsetzung eines späteren Produktes, ein Versuchsmodell oder ein Entwurfsmuster verstanden [4]. Der Grund für den Einsatz von Prototypen hängt immer von der aktuellen Phase des Entwicklungsprozesses ab [5]. Generell geht es um die Evaluierung von spezifischen Eigenschaften des zu entwickelnden Produkts [6]. Prototypen ermöglichen dem Entwickler, den Entwicklungsstand zu einem frühen Zeitpunkt physisch zu begutachten und erste Tests durchzuführen, wie z. B. Bauraumuntersuchungen oder Einbauversuche [7]. Darüber hinaus liefern Prototypversuche in Verbindung mit Struktursimulationen zusätzliche Informationen, da der Ingenieur durch die Verbindung von Simulation und Versuch eine zusätzliche Erfahrungsebene erhält. Diese Informationen helfen dem Konstrukteur dabei, bessere Bauteilkonzepte und Berechnungsweisen zu entwickeln [8].

In den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses eines Spritzgießbauteils können wichtige Entscheidungen jedoch nicht durch Versuche an seriennahen Musterteilen abgesichert werden, da die Formwerkzeuge des Serienteils noch nicht zur Verfügung stehen. Versuche an durch Rapid Prototyping hergestellten Prototypen sind in diesem Fall eine sehr gute Möglichkeit zur Überprüfung von Geometrie und Bauteildimensionierung [8]. Der gezielte Einsatz von Prototypen im Entwicklungsprozess von Spritzgießbauteilen stellt dann einen erheblichen Mehrwert dar, wenn mithilfe von Prototypversuchen sowohl eine frühzeitige Überprüfung von Simulationsergebnissen als auch die Bewertung der Funktionserfüllung von Bauteilkonzepten möglich sind. Der Verzicht auf den Einsatz von realen Prototypen zugunsten einer rein virtuellen Produktentwicklung birgt immer das Risiko, dass grundsätzliche Fehler in den Simulationsrandbedingungen übersehen werden. Oftmals kann ein einfacher Versuch Fehler aufzeigen, die ohne ihn unentdeckt geblieben wären. Auf diese Weise können Fehler frühzeitig korrigiert und wichtige Entscheidungen im Entwicklungsprozess endgültig getroffen werden. Ein rechtzeitig erkannter Schwachpunkt kann unter Umständen zu grundlegenden Änderungen im Projektablauf führen. In solchen Fällen ist es umso wichtiger, die Anpassung der Anforderungen so früh wie möglich vorzunehmen, um Zeit und Kosten zu sparen. Problematisch beim Einsatz von Prototypen im Entwicklungsprozess von Spritzgießteilen ist allerdings, dass das Fertigungsverfahren in der Regel einen deutlichen Einfluss auf die Eigenschaften des späteren Bauteils hat. Dies führt dazu, dass sich die Eigenschaften des Prototyps und die des Serienteils deutlich voneinander unterscheiden [9]. Vorhandene Unterschiede müssen durch Korrekturfaktoren oder die Veränderung der Versuchsparameter berücksichtigt werden [8]. Es gibt grundsätzlich verschiedene Verfahren zur Herstellung von Prototypen. Generative Fertigungsverfahren (siehe Abschnitt 2.2) bieten gegenüber den subtraktiven Verfahren die größere Gestaltungsfreiheit. Durch werkzeuglose Fertigung können mit generativen Verfahren schnell und kostengünstig Prototypen von komplexen Bauteilen hergestellt werden. Aktuell werden die Möglichkeiten der generativen Verfahren zur schnellen Fertigung von Prototypen jedoch nicht vollständig ausgeschöpft [10].

Eine der Herausforderungen bei der Verwendung von generativen Fertigungsverfahren zur Herstellung von Funktionsprototypen ist, dass aufgrund der schnellen Weiterentwicklung der einzelnen Verfahren und Werkstoffe die Leistungsfähigkeit sowie die Eigenschaften der erzeugten Bauteile nur unzureichend untersucht und dokumentiert sind. Dies beginnt bereits mit der eingeschränkten Verfügbarkeit von Werkstoffkennwerten sowie Kurzzeit-Spannungs-Dehnungs-Kurven. Noch schlechter sieht es bei der Dokumentation der Langzeiteigenschaften von Sintermaterialien in Form von Kriechkurven bzw. isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagrammen aus. Sie sind weder in den Werkstoffdatenblättern der Materialher-

steller [11] [12] noch in den gängigen Materialdatenbanken wie der CAMPUS-Datenbank oder dem Material Data Center (siehe Unterabschnitt 4.2.2) zu finden. Insgesamt befindet sich die Charakterisierung des Langzeitverhaltens von generativ hergestellten Bauteilen in unterschiedlichen Belastungszuständen noch in den Anfängen. Es sind lediglich vereinzelte wissenschaftliche Untersuchungen zu diesem Thema verfügbar [13]. Moeskops [14] hat beispielsweise das Kriechverhalten von lasergesintertem PA 12 untersucht, und Munguia [15] hat erste Versuche zur Charakterisierung der Materialermüdung von lasergesinterten Probestäben im Umlaufbiegeversuch durchgeführt. Des Weiteren sind die verfügbaren Materialkennwerte in den Datenblättern der Hersteller oft ungenügend dokumentiert, was die Verwendbarkeit der Daten für die Bauteildimensionierung sehr stark einschränkt (siehe Unterabschnitt 4.2.2). Es fehlen sowohl Angaben zu den Prüfbedingungen als auch zur Probenvorbereitung. Darüber hinaus existieren aktuell keine Methoden, die eine zuverlässige Vorhersage des statischen und dynamischen Verhaltens von generativ hergestellten Prototypen/Bauteilen zulassen. Aus den genannten Gründen ist deren Verwendung zur Absicherung von Entwicklungsprozessen für Spritzgießbauteile aktuell nur bedingt möglich.

In dieser Dissertation wird mithilfe eines wissenschaftlichen Ansatzes überprüft, ob durch Selektives Lasersintern (SLS) (siehe Abschnitt 2.3), das zur Gruppe der generativen Fertigungsverfahren gehört, Funktionsprototypen bzw. technische Prototypen (siehe Abschnitt 2.1) gefertigt werden können, die einen signifikanten Mehrwert im Entwicklungsprozess von Spritzgießbauteilen darstellen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Untersuchung von Prototypen und Bauteilen aus glaskugelgefülltem Polyamid 12 (PA 12 GK) (siehe Abschnitt 4.2). Dieser Werkstoff besitzt im Vergleich zu ungefülltem Polyamid einen höheren Elastizitätsmodul (E-Modul), was hinsichtlich der charakteristischen Eigenschaften des verwendeten Beispielbauteils (siehe Abschnitt 1.3) von Vorteil ist. Für den ausgewählten Sinterwerkstoff sind bisher kaum wissenschaftliche Untersuchungen vorhanden. Aus diesem Grund werden die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem PA 12 GK im Rahmen der vorliegenden Arbeit zunächst grundlegend charakterisiert und mit denen von spritzgegossenem PA 12 GK verglichen. Aufbauend auf der systematischen Materialcharakterisierung wird der quantitative Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften eines lasergesinterten Funktionsprototyps und den Eigenschaften des späteren Spritzgießbauteils analysiert und ausführlich diskutiert. Ein reproduzierbarer quantitativer Zusammenhang zwischen Sinterprototyp und Spritzgießbauteil ermöglicht anhand von Versuchen an lasergesinterten Funktionsprototypen quantitative Rückschlüsse auf die mechanischen Eigenschaften des späteren Spritzgießbauteils. Auf diese Weise wird die Sicherheit bei der Bauteildimensionierung erheblich verbessert, da der Konstrukteur die Funktionserfüllung von Bauteilkonzepten mithilfe eines wissenschaftlichen Korrelationsansatzes frühzeitig im Entwicklungsprozess absichern kann. Zusätzlich wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht, ob mit Versuchen an lasergesinterten Prototypen Ergebnisse erzielt werden können, die die zuverlässige Absicherung von Simulationsergebnissen ermöglichen.

## 1.1 Aufbau der vorliegenden Arbeit

Abbildung 1.1 zeigt die wichtigsten Bestandteile und den Aufbau dieser Arbeit. Die Kapitel 2 bis 4 beschäftigen sich mit den Grundlagen, die für das Verständnis der Arbeit und der vorgestellten Systematik notwendig sind. Sie bilden das Fundament des dargestellten Projekthauses. In Kapitel 5 werden die mechanischen Eigenschaften und das Verhalten von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK durch Werkstoffprüfungen systematisch analysiert und diskutiert. Mithilfe der Versuchsergebnisse werden für beide Werkstoffe ausgewählte, kunststofftypische Einflussfaktoren quantifiziert, um die mechani-



schen Eigenschaften der Materialien zu charakterisieren und die Ausprägung des jeweiligen Einflussfaktors direkt miteinander zu vergleichen.

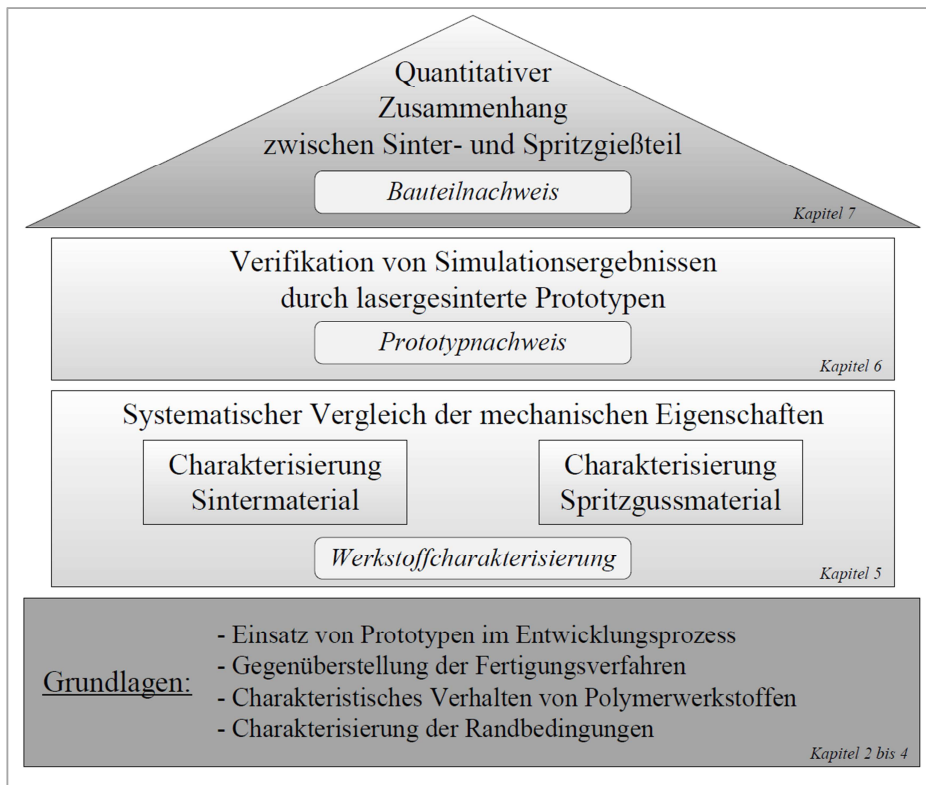


Abbildung 1.1: Projekthaus zum Aufbau der vorliegenden Arbeit

Die Durchführung von Struktursimulationen ist ein wichtiges Hilfsmittel bei der Dimensionierung von Kunststoffbauteilen. In Kapitel 6 werden die zuvor ermittelten Werkstoffkennwerte zur Erstellung von Materialmodellen für lasergesintertes PA 12 GK verwendet. Mithilfe eines wissenschaftlichen Ansatzes wird erörtert, welche Art von Materialmodell benötigt wird, um das Kurzzeitverhalten von lasergesinterten Bauteilen korrekt in der Strukturanalyse abzubilden. Die Simulationsergebnisse werden durch Bauteilversuche an lasergesinterten Prototypen verifiziert.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit und der Grund für den systematischen Vergleich der mechanischen Eigenschaften ist die Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs zwischen dem Verhalten des Sinterprototyps und des späteren Spritzgießteils (siehe Kapitel 7). Ein solcher Zusammenhang stellt einen erheblichen Mehrwert im Entwicklungsprozess dar, da Bauteilkonzepte auf diese Weise frühzeitig abgesichert werden können. Als Vergleichsgrundlagen werden zum einen die ermittelten Werkstoffkennwerte und zum anderen Bauteilnachweise verwendet. Derartige Vergleiche der mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten und spritzgegossenen Bauteilen wurden bisher nur sehr uneinheitlich durchgeführt [16]. Als Bauteil zur Durchführung der wissenschaftlichen Vergleichsuntersuchungen wird nachfolgend das Funktionselement einer Ausgleichkupplung verwendet. Die grundsätzliche Funktionsweise einer Ausgleichkupplung wird in Abschnitt 1.3 ausführlich erläutert.

## 1.2 Systematischer Lösungsansatz

Der systematische Lösungsansatz gliedert sich in vier aufeinander aufbauende Zielstellungen, die sich aus dem zuvor erläuterten Aufbau der Arbeit (siehe Abbildung 1.1) ergeben. Die einzelnen Zielstellungen werden nachfolgend detailliert erläutert.

### **Bereitstellung von grundlegenden Materialkennwerten für lasergesintertes PA 12 GK**

Für eine Vielzahl von Sintermaterialien stehen aktuell nur unzureichend dokumentierte Materialkennwerte zur Verfügung. In den Datenblättern der Hersteller fehlen häufig Angaben zur verwendeten Probenform, den Prüfbedingungen und dem Konditionierungszustand (siehe Unterabschnitt 4.2.2). In herstellerübergreifenden Materialdatenbanken, wie z. B. der CAMPUS-Datenbank [17], sind die Datenblätter von Lasersintermaterialien gar nicht zu finden. Deshalb werden die mechanischen Eigenschaften des eingesetzten Sintermaterials im Rahmen dieser Arbeit zuerst grundlegend untersucht, bevor die Eignung von Lasersinterteilen als Funktionsprototyp/Technischer Prototyp für Spritzgießbauteile beurteilt werden kann. Zur Durchführung von Struktursimulationen werden ebenfalls sorgfältig dokumentierte Werkstoffkennwerte und Spannungs-Dehnungs-Kurven benötigt. Aus den genannten Gründen werden die mechanischen Eigenschaften des ausgewählten Sintermaterials (PA 12 GK) mithilfe von uniaxialen Zugversuchen ausführlich charakterisiert (siehe Kapitel 5). Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Werkstoffkennwerte können zur Dimensionierung von Lasersinterbauteilen aus PA 12 GK verwendet werden. Auf diese Weise wird eine Verwendung dieses Fertigungsverfahrens zur Herstellung von Endprodukten, die in kleiner Stückzahl gefertigt werden sollen, ermöglicht.

#### **Ziele:**

- Bereitstellung von vollständig dokumentierten Kennwerten für das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von lasergesintertem PA 12 GK
- Darstellung des Einflusses der Glaskugeln auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von lasergesintertem PA 12 GK
- Quantifizierung des Einflusses ausgewählter kunststofftypischer Einflussfaktoren auf die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem PA 12 GK

### **Systematischer Vergleich der mechanischen Eigenschaften**

Obwohl systematische Vergleiche der mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten und spritzgegossenen Bauteilen bisher nur unzureichend durchgeführt wurden [16], wird SLS für Kleinserien bereits als Alternative zum Spritzgießen (SG) gehandelt [18]. In dieser Dissertation wird mithilfe von Werkstoff- und Bauteilprüfungen ein systematischer Vergleich der mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK erarbeitet (siehe Kapitel 5 und 7).

#### **Ziele:**

- Vergleich der Anisotropie der mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK
- Gegenüberstellung des Einflusses ausgewählter kunststofftypischer Faktoren für lasergesintertes und spritzgegossenes PA 12 GK
- Vergleich der mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK durch Werkstoffprüfungen und Bauteilnachweise

### **Materialmodelle zur Simulation des Kurzzeitverhaltens von Lasersinterbauteilen**

Um lasergesinterte Prototypen zur Absicherung von Simulationsergebnissen und Bauteilkonzepten einsetzen zu können, muss das Bauteilverhalten des Sinterteils zuverlässig durch von Struktursimulationen abgebildet werden können (siehe Kapitel 6). Auch um mithilfe der Prototypversuche die Eigenschaften eines späteren Spritzgießteils quantitativ bewerten zu können, werden Struktursimulationen benötigt

(siehe Kapitel 7). Ein wichtiger Punkt bei der Durchführung von Simulationen ist die Erstellung des Materialmodells. Die Herausforderung dabei sind die anisotropen Materialeigenschaften von lasergesinterten Bauteilen. In der vorliegenden Arbeit werden Bauteilversuche an lasergesinterten Prototypen zur Verifikation von Simulationsergebnissen eingesetzt.

#### Ziele:

- Definition von elastisch-plastischen Materialmodellen für glaskugelgefülltes Sinterpolyamid
- Abbildung des anisotropen Materialverhaltens in der Struktursimulation
- Überprüfung der Verifizierbarkeit von Simulationsergebnissen durch Versuche an lasergesinterten Prototypen

#### **Quantitativer Zusammenhang zur Absicherung von Bauteilkonzepten**

Die Absicherung von Bauteilkonzepten ist wie bereits erwähnt ein entscheidendes Kriterium beim Treffen von wichtigen Entscheidungen im Entwicklungsprozess. Quantitativ bewertbare Versuchsergebnisse erleichtern derartige Entscheidungen erheblich. Bei der Entwicklung von Spritzgießteilen ist es jedoch schwierig, zu einem frühen Zeitpunkt derartige Versuche durchzuführen, da die Verfügbarkeit von geeigneten Prototypen nicht gegeben ist. Bisher liegen keine ausreichenden Erkenntnisse vor, ob lasergesinterte Prototypen diesbezüglich Abhilfe schaffen können. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit mithilfe eines wissenschaftlichen Ansatzes diskutiert, inwieweit eine Korrelation zwischen dem Verhalten von lasergesinterten und spritzgegossenen Bauteilen hergestellt werden kann. Zu diesem Zweck werden die mechanischen Eigenschaften des Sintermaterials und die des Spritzgusswerkstoffs zunächst auf der Grundlage von uniaxialen Kurzzeit-Zugversuchen miteinander verglichen. Im Anschluss daran erfolgt die Überprüfung der Übertragbarkeit des im Zugversuch ermittelten Zusammenhangs auf Bauteilversuche (siehe Kapitel 7).

#### Ziele:

- Darstellung des quantitativen Zusammenhangs zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK auf Bauteilebene
- Überprüfung der Eignung von lasergesinterten Prototypen zur frühzeitigen Absicherung der mechanischen Belastbarkeit von Bauteilkonzepten für thermoplastische Spritzgießbauteile aus PA 12 GK mithilfe eines wissenschaftlichen Korrelationsansatzes

Die aus den dargestellten Zielstellungen resultierenden Ergebnisse sind insbesondere für Entwicklungsingenieure, die sich mit der belastungsgerechten Dimensionierung von Spritzgießbauteilen beschäftigen, von Bedeutung. Mithilfe der Ergebnisse kann die Sicherheit bei der Dimensionierung von thermoplastischen Spritzgießbauteilen aus glaskugelgefülltem PA 12 erheblich verbessert werden. Darüber hinaus wird Firmen, denen nicht das gesamte Portfolio an Simulationsprogrammen zur Verfügung steht, mit dieser wissenschaftlichen Untersuchung eine strukturierte Möglichkeit aufgezeigt, wie ein Entwicklungsprozess eines Spritzgießbauteils frühzeitig abgesichert werden kann. Ohne gesicherte Erkenntnisse scheuen Unternehmen oftmals die vergleichsweise hohe Investition in ein Spritzgießwerkzeug und entscheiden sich gegen die Umsetzung als Kunststoffspritzgießteil. Auf diese Weise trägt diese Arbeit dazu bei, dass das Potenzial des Spritzgießverfahrens zur Herstellung von kostengünstigen Bauteilen mit hoher Funktionsintegration zukünftig besser genutzt werden kann.

### 1.3 Beispielbauteil

Als Beispielbauteil wird das Funktionselement einer Ausgleichskupplung verwendet. Grundsätzlich besteht die Hauptfunktion von Kupplungen in der Übertragung von Rotationsenergie. Sie übertragen die Energie von der Antriebs- auf die Abtriebswelle. Diese Funktion wird Leitungsfunktion genannt. Zudem können Kupplungen Zusatzfunktionen, wie zum Beispiel den Ausgleich von radialen ( $\Delta K_r$ ), axialen ( $\Delta K_a$ ) und winkligen ( $\Delta K_w$ ) Wellenverlagerungen (siehe Abbildung 1.2), übernehmen. Derartige Kupplungen werden Ausgleichskupplungen genannt [19].

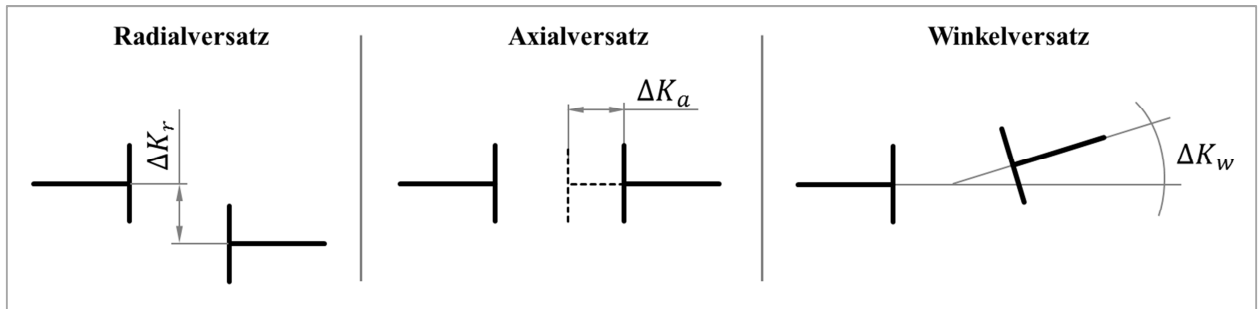


Abbildung 1.2: Arten von Wellenverlagerungen gemäß [20]

Abbildung 1.3 zeigt eine Ausgleichskupplung der betrachteten Bauart. Sie besteht aus einem Funktionselement aus Kunststoff und zwei Klemmnaben aus Aluminium. Das Funktionselement ist mithilfe einer Stiftverbindung formschlüssig zwischen den Naben befestigt.

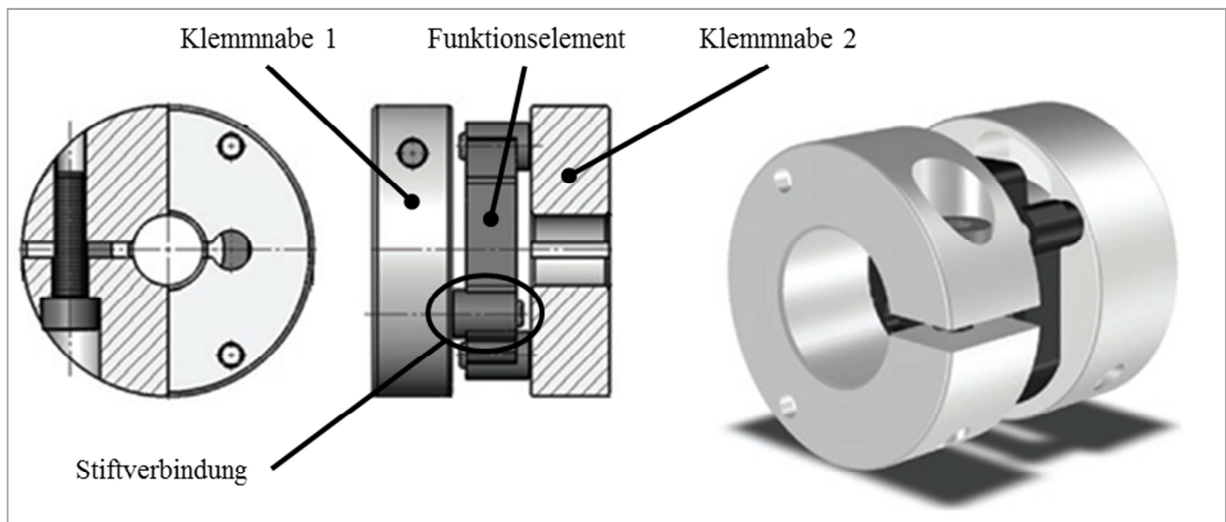


Abbildung 1.3: Ausgleichskupplung [21]

Während des Betriebs wird das Funktionselement, das auch Ausgleichselement genannt wird, dynamisch belastet. Das einwirkende Lastkollektiv besteht aus einem Torsionsmoment und einer wechselnden Verformung. Die Torsionsbelastung resultiert aus der zu übertragenden Rotationsenergie. Die wechselnde Verformung ergibt sich aus dem Wellenversatz, der zwischen Antriebs- und Abtriebswelle vorhanden ist (siehe Abbildung 1.2). Eine Umdrehung stellt für die Kupplung ein Lastspiel dar, da sie durch den vorhandenen Wellenversatz pro Umdrehung einmal wechselnd verformt wird. Die Klemmnaben müssen so dimensioniert sein, dass sie das maximal zulässige Drehmoment dauerhaft übertragen können. In diesem Beitrag wird lediglich das dynamisch belastete Funktionselement einer Ausgleichskupplung als Beispielbauteil verwendet. Aus diesem Grund werden die Klemmnaben nachfolgend nicht näher betrachtet.

## 2 Lasergesinterte Prototypen im Entwicklungsprozess von Spritzgießbauteilen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird mithilfe eines wissenschaftlichen Ansatzes analysiert, welcher Mehrwert durch den gezielten Einsatz von lasergesinterten Prototypen im Entwicklungsprozess eines thermoplastischen Spritzgießbauteils aus PA 12 GK erzielt werden kann. Der Grund für den Einsatz eines Prototyps und die an ihn gestellten Anforderungen sind abhängig vom Einsatzzeitpunkt im Entwicklungsprozess. Die benötigte Prototypenart ergibt sich stets aus den Anforderungskriterien. Grundsätzlich geht es beim Einsatz von Prototypen um die Evaluierung von spezifischen Eigenschaften des zu entwickelnden Produkts [6]. Durch die effektive Verwendung von Prototypen können Zwischenschritte im Entwicklungsprozess, z. B. der Funktionsmusterbau, beschleunigt oder komplett übersprungen werden [22].

### 2.1 Prototyparten

Die Verfügbarkeit von hochwertigen Prototypen, deren Eigenschaften weitestgehend denen des späteren Serienbauteils entsprechen, ist oftmals ein entscheidendes Kriterium für die Effizienz und die Qualität eines Entwicklungsprozesses [23]. In der Literatur werden grundsätzlich folgende Arten von Prototypen unterschieden [5] [6]:

- **Konzeptmodell**
  - o Frühestmögliche physische Realisierung eines Produktdesigns
  - o Visualisierung des grundsätzlichen Erscheinungsbildes
  - o Überprüfung des ästhetischen Eindrucks als wichtigste Zielgröße
  - o Material, Funktion und Maße entsprechen nicht den Produkthanforderungen
- **Geometrieprototyp**
  - o Prüfung von Handhabung und Bedienbarkeit
  - o Visualisierung der endgültigen Form
  - o Beurteilung von Maß, Form und Lage
  - o Erfüllung gewisser Anforderungen des späteren Serienteils
- **Funktionsprototyp**
  - o Überprüfung von Teilfunktionen
  - o Erfüllung definierter Produktfunktionen des späteren Serienteils
  - o Abweichungen in Form und Gestalt vom späteren Produkt zulässig
- **Technischer Prototyp**
  - o Überprüfung des Bauteils in Versuch und Vorserie
  - o Herstellung aus Serienmaterial oder serienähnlichem Material
  - o Fertigung mithilfe des Serienverfahrens nicht zwingend erforderlich
  - o Erfüllung nahezu aller Anforderungen des späteren Serienteils
- **Endprodukt (Serienteil)**
  - o Bestimmungsgemäß einzusetzendes, marktfähiges Produkt
  - o Erfüllung aller Anforderungen gemäß Anforderungsliste

Die unterschiedlichen Prototypen werden üblicherweise in bestimmten Phasen der Produktentwicklung eingesetzt. Bei der Verwendung von Prototypen muss allerdings immer berücksichtigt werden, dass diese nicht das vollständige Eigenschaftsspektrum von Serienbauteilen haben. Die eingeschränkte Aussagefähigkeit hat zur Folge, dass nicht alle Fragen der Entwickler bezüglich des Produkteinsatzes und der Se-

rienherstellung im Vorfeld mithilfe von Prototypen beantwortet werden können [24]. Deshalb ist es besonders wichtig, dass die Güte der zur Verfügung stehenden Prototypen sorgfältig analysiert und bewertet wird. Dies kann zum Beispiel durch Strukturanalysen (siehe Kapitel 6), Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen (FMEA), Werkzeug- und Formfüllanalysen (siehe Unterabschnitt 6.4.2) und Prüfungen am konkreten Modell (siehe Kapitel 6 und 7) erfolgen [9]. Im Rahmen dieser Arbeit werden Funktionsprototypen zur Verifikation von Simulationsergebnissen (siehe Kapitel 6) und Technische Prototypen zur Analyse des quantitativen Zusammenhangs zwischen den mechanischen Eigenschaften eines lasergesinterten und eines spritzgegossenen Bauteils eingesetzt (siehe Kapitel 7).

## 2.2 Prototypfertigung

Eng verknüpft mit der Art des Prototyps ist die Wahl des Herstellungsverfahrens. Bei immer kürzer werdenden Produktentwicklungszeiten spielt die schnelle Verfügbarkeit von Prototypen eine entscheidende Rolle. Während der Fertigungszeit geht die Produktentwicklung in der Regel „blind“ weiter, ohne dass die Bauteilkonzepte mithilfe von Prototypversuchen überprüft werden konnten. Bei gleicher Fertigungszeit des Prototyps muss die Reife des Produkts in einem kurzen Entwicklungsprozess allerdings wesentlich weiter voranschreiten als in einem langen Prozess. Die Fertigungszeit ist demnach ein sehr wichtiger Faktor bei der Wahl des Prototyping-Verfahrens. Kurze Entwicklungszeiten erfordern ebenfalls kurze Fertigungszeiten [4]. Für den frühzeitigen und schnellen Einsatz im Entwicklungsprozess eignen sich besonders Prototyping-Verfahren, die ohne die Herstellung von kostenintensiven Werkzeugen auskommen. Die endgültige Wahl des Fertigungsverfahrens sollte immer anhand der Anforderungen getroffen werden, da jedes Verfahren eigene Besonderheiten aufweist. In der vorliegenden Arbeit werden lasergesinterte Prototypen zur Verifikation von Simulationsergebnissen (siehe Kapitel 6) und zur quantitativen Absicherung von Bauteilkonzepten eingesetzt (siehe Kapitel 7). Der Grund für den Einsatz des Lasersinterverfahrens ist, dass dieses Verfahren besonders geeignet ist, um mechanisch belastbare Teile herzustellen (siehe Tabelle 2.2). Lasersintern gehört zur Gruppe der generativen Fertigungsverfahren, auf die nachfolgend genauer eingegangen wird.

### 2.2.1 Einordnung der generativen Fertigungsverfahren

Grundsätzlich können alle Fertigungsverfahren nach der Art der Geometrieerzeugung in drei Gruppen (subtraktive, formative und additive Verfahren) eingeteilt werden. Generative (additive) Fertigungsverfahren, zu denen auch das in dieser Arbeit betrachtete Lasersintern gehört, automatisieren das Schichtbauverfahren, das die Geometrieerzeugung durch Aneinanderfügen von Einzelschichten beschreibt. Die Erzeugung der mechanisch technologischen Bauteileigenschaften geschieht während des Bauprozesses. In der Praxis werden additive und generative Fertigungsverfahren in der Regel gleichgesetzt [4] [25]. Meist werden diese Verfahren unter dem Namen 3D-Druck zusammengefasst [26]. Die aktuelle VDI-Richtlinie 3404 definiert und verwendet den Begriff generative Fertigungsverfahren. Deshalb wird nachfolgend ebenfalls diese Bezeichnung verwendet.

Im Unterschied zu den subtraktiven Verfahren, bei denen Fertigungskosten entstehen, wenn Material vom Halbzeug entfernt wird, fallen bei den generativen Verfahren Kosten an, wenn Material hinzugefügt wird [10]. Das Wort generativ stammt aus dem Lateinischen und bedeutet erzeugend bzw. urformend. Generative Fertigungsverfahren sind aufbauende Verfahren, bei denen das spätere Bauteil element- oder

schichtweise hergestellt wird [6]. Das englische Pendant zum deutschen Begriff generative Fertigungsverfahren lautet Additive Manufacturing (AM) [4]. In der Literatur werden generative Verfahren fälschlicherweise oftmals mit dem Begriff Rapid Prototyping (RP) gleichgesetzt, da diese Art der Fertigung schneller als Wettbewerbsverfahren, wie zum Beispiel die spanende Fertigung, ist. Diese Verallgemeinerung ist nicht korrekt. Rapid Prototyping bezeichnet lediglich die Untermenge der generativen Fertigungsverfahren, die zur Herstellung von Prototypen verwendet wird [4] [24]. Auf der Technologieebene werden generative Fertigungsverfahren als Rapid-Technologie bezeichnet. Die Rapid-Technologie kann auf der Anwendungsebene allerdings wesentlich vielfältiger eingesetzt werden als nur zur Fertigung von Prototypen (Rapid Prototyping). Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind zum einen die Fertigung von Endprodukten (Rapid Manufacturing) und zum anderen die Herstellung von Werkzeugen bzw. Werkzeugeinsätzen (Rapid Tooling) [4] [25] [27]. Die zuvor genannten Anwendungen werden in der VDI-Richtlinie 3404 [6] wie folgt definiert:

- **Rapid Prototyping (RP)**
  - Generative Herstellung von Bauteilen mit eingeschränkter Funktionalität
  - Erfüllung ausgewählter Eigenschaften, z. B. Geometrie, Haptik
  - Material kann dem Serienmaterial entsprechen
  - Konstruktion kann fertigungsgerecht im Sinne der Serienfertigung sein
- **Rapid Manufacturing (RM)**
  - Generative Herstellung von Endprodukten/Serienteilen
  - Bauteil weist alle Merkmale des Endprodukts auf
  - Bauteil wird vom Kunden für den Serieneinsatz akzeptiert
  - Material ist identisch mit dem des Endprodukts
  - Konstruktion entspricht der des Endprodukts
- **Rapid Tooling (RT)**
  - Generative Herstellung von Werkzeugen, Werkzeugeinsätzen und Formen

Nicht alle generativen Fertigungsverfahren sind für jede der genannten Anwendungsmöglichkeiten der Rapid-Technologie geeignet, da einige Verfahren lediglich zur Herstellung von Konzeptmodellen oder Geometrieprototypen, die keine höheren Ansprüche hinsichtlich der Belastbarkeit erfüllen müssen, eingesetzt werden können [28]. Auf die Verfahrensvielfalt und die Eignung für bestimmte Anwendungen wird in Unterabschnitt 2.2.2 näher eingegangen.

Der Begriffsbestandteil „Rapid“ (engl. schnell, kurzfristig) verdeutlicht die ökonomischen Ziele der Anwendungsmöglichkeiten der Rapid-Technologie. Im Vordergrund steht die Verkürzung der Entwicklungs- und Fertigungszeit, die durch den Einsatz dieser Fertigungsverfahren erreicht werden soll. Insbesondere die TTM soll verkürzt werden, um den daraus entstehenden Wettbewerbsvorteil zu nutzen [29]. Allerdings sind generative Fertigungsverfahren nicht grundsätzlich schneller als andere Fertigungsverfahren. Schnell ist ein relativer Begriff und bekommt erst eine Qualität, wenn gesagt werden kann, wie schnell bzw. wie viel schneller generative Fertigungsverfahren als andere Verfahren sind. Schneller als Wettbewerbsverfahren, wie z. B. das Spritzgießen sind generative Verfahren zur Fertigung von Prototypen und Kleinserien, weil direkt aus den 3D-CAD-Daten erste Bauteile hergestellt werden können, ohne dass Werkzeuge konstruiert und gefertigt werden müssen (siehe Unterabschnitt 2.3.1). Auch bei der losgrößenunabhängigen Fertigung von hochkomplexen oder individualisierten Produkten sind generative Fertigungsverfahren schneller als subtraktive oder formative Fertigungsverfahren. Hinsichtlich der Fertigungszeit pro Teil ist das Spritzgießverfahren bei Großserienbauteilen allerdings deutlich schneller [4].

Im Rahmen dieser Arbeit werden generative Fertigungsverfahren vorrangig zum Rapid Prototyping, also zur schnellen Herstellung von Prototypen, eingesetzt. Es werden Funktionsprototypen und technische Prototypen eines späteren Spritzgießteils hergestellt.

Die zuvor erwähnte Schnelligkeit ist jedoch nicht der einzige Vorteil der generativen Fertigungsverfahren. Dies gilt insbesondere dann, wenn diese Verfahren nicht nur zum Rapid Prototyping eingesetzt werden. Ein weiterer wichtiger Vorteil, der besonders beim Rapid Manufacturing oder Rapid Tooling zum Tragen kommt, ist die Geometriefreiheit, die sich aus der werkzeuglosen Fertigung ergibt [4] [6] [24]. Aus der werkzeuglosen Fertigung resultieren wiederum weitere Vorzüge gegenüber etablierten Fertigungsverfahren, die den Einsatz der generativen Verfahren für die in Tabelle 2.1 genannten Anwendungen interessant macht. Um alle Vorteile hinsichtlich des Rapid Manufacturings auszunutzen, muss allerdings sehr früh im Entwicklungsprozess entschieden werden, dass ein Bauteil oder eine Baugruppe mithilfe dieser Verfahren hergestellt werden soll. Darüber hinaus wird für den effektiven Einsatz dieser Verfahren spezielles Anwendungs-, Konstruktions- und Technologie-Know-how benötigt [10] [26].

Tabelle 2.1: Anwendungsmöglichkeiten für generative Fertigungsverfahren in Anlehnung an [10] [26] [28] [30]

Realisierung besserer Produkte		Optimierung des Produktionsprozesses	Verbesserung des Produktlebenszyklusses	
Leichtbau	innenliegende Gitterstrukturen	Ökonomische Produktion ab Losgröße 1	kurzfristige Produktanpassungen	
	Hohlstrukturen		Effizienzsteigerung durch Support-Teile	Fertigung von Urmodellen, verlorenen Formen
	Funktionsintegration	Fertigung von Werkzeugen/Werkzeugeinsätzen mit konturnaher Kühlung		Fertigung von Montagehilfen, Schablonen
Produkt-personalisierung	Medizintechnik	Fertigung komplexer Bauteile mit hoher Funktionsintegration	Kostengünstigere, schnellere und flexiblere Supply Chain	Produktion on Demand in Losgröße 1
	Sport			Sicherung der Ersatzteilversorgung
Funktions-optimierung	Funktionsintegration	Produktion verschiedener Bauteile in einem Baujob	Bridge Manufacturing	Flexibler Produktlaunch
	Reduktion von fit & assembly			Fertigung von Nullserien vor d. Investition in Wzg.
Bionische Produktdesigns			Schnelles Prototyping	

### 2.2.2 Verfahrensvielfalt der generativen Fertigungsverfahren

Die Bandbreite der generativen Fertigungsverfahren ist mittlerweile sehr groß. Die Gemeinsamkeit aller Verfahren ist, dass die Geometrie des späteren Bauteils schichtweise hergestellt wird. Hinsichtlich des verwendeten Ausgangsmaterials und des technologischen Prinzips der Modellerstellung existieren jedoch große Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren [22] [28]. Auch hinsichtlich der Verwendbarkeit der einzelnen Verfahren zur Herstellung von belastbaren Bauteilen bestehen noch große Unterschiede. Nur wenige Verfahren haben nach langjähriger Entwicklungszeit die technologische Reife erreicht, die zur Herstellung von technisch anspruchsvollen und mechanisch belastbaren Teilen notwendig ist [28]. Tabelle 2.2 zeigt die Einteilung der generativen Fertigungsverfahren in verschiedene Untergruppen. Grundsätzlich wird zwischen Verfahren mit festem, flüssigem und gasförmigem Ausgangsmaterial unterschieden. Im zweiten Schritt erfolgt dann die Unterteilung gemäß dem verwendeten technologischen Prinzip. Zusätzlich sind in der Tabelle die mechanischen Eigenschaften der erzeugten Bauteile und die Verwendbarkeit des jeweiligen Verfahrens für verschiedene Rapid-Anwendungen aufgeführt. An dieser



Stelle wird von einer detaillierten Beschreibung der einzelnen generativen Fertigungsverfahren abgesehen. Die Funktionsweise sowie die Vor- und Nachteile der wichtigsten kommerziell verfügbaren Verfahren sind ausführlich in folgenden Quellen erläutert: [4] [6] [22] [31] [32] [33] [34].

Tabelle 2.2: Einteilung generativer Fertigungsverfahren gemäß [22], erweitert gemäß [4] [6] [28] [35] [36] [37] [38]

Ausgangsmaterial			Technologisches Prinzip		Verfahren	Abkürzung	mechanische Eigenschaften	Anwendung					
								Rapid Prototyping					Rapid Manufacturing
								Konzeptmodell	Geometrie-prototyp	Funktions-prototyp	Technischer Prototyp		
fest	folienförmig	→	Zuschneiden und flächiges Verkleben	→	Laminated Object Manufacturing	LOM	-	+	o	o	-	-	
					Layer Laminated Manufacturing	LLM							
	strangförmig	→	Aufschmelzen und strangförmiges Auftragen	→	Fused Deposition Modeling	FDM	+	o	o	+	o	o	
					Fused Layer Modeling/ Manufacturing	FLM							
	granulatförmig	→	Aufschmelzen und tropfenförmiges Auftragen	→	Arburg Kunststoff-Freiformen (Arburg freeformer)	AKF	neues Verfahren (Verkaufsstart Deutschland 2014, weitere 2015)						
			Aufschmelzen und linienförmiges Auftragen	→	Multi Jet Modeling	MJM	o	+	+	o	o	-	
	pulverförmig	→	lokales Verfestigen durch Binder	→	3D-Printing	3DP	-	+	o	o	-	-	
			lokales Aufschmelzen durch Laserstrahl	→	Selektives Lasersintern	SLS	+	o	+	+	+	+	
					Selektives Strahlschmelzen	SLM	+	o	+	+	+	+	
			lokales Aufschmelzen durch Elektronenstrahl	→	Elektron Beam Melting	EBM	+	o	+	+	+	+	
			lokales Aufschmelzen durch thermischen Druckkopf	→	Selective Heat Sintering	SHS	neues Verfahren (Verkaufsstart Europa Mai 2014)						
			flächiges Aufschmelzen durch Infrarotstrahler	→	Maskensintern	MS	o	o	+	o	-	-	
flüssig	→	Aushärten durch UV-Strahlung	→	Poly-Jet Modeling	PJM	o	+	+	o	o	-		
				Digital Light Processing	DLP	o	o	+	o	-	-		
	→	Aushärten durch Laserstrahl	→	Stereolithografie	SLA	o	+	+	o	o	o		
gasförmig	→	physikalisches Abscheiden aus Aerosolen	→	Aerosoldruckverfahren		k.A.	k.A.						
	→	chemisches Abscheiden aus der Gasphase	→	Laser Chemical Vapor Deposition	LCVD	k.A.	k.A.						
							+ hoch o mittel - gering	+ empfehlenswert o möglich - nicht empfehlenswert					

Trotz der großen Vielzahl unterschiedlicher Verfahren verbleiben aktuell nur wenige, die zur Herstellung von Funktionsprototypen/Technischen Prototypen und Endbauteilen (Rapid Manufacturing) eingesetzt werden können, wenn die hergestellten Bauteile nach industrietypischen Kriterien wie mechanische Eigenschaften, thermische Stabilität und Langzeitstabilität bewertet werden. Besonders geeignet ist das Selektive Lasersintern (SLS) [14] [28]. Dieses generative Fertigungsverfahren wird nachfolgend genauer betrachtet und im weiteren Verlauf der Arbeit zur Fertigung von Probestäben und Prototypen eingesetzt.

### 2.3 Lasersintern/Selektives Lasersintern

Die Entwicklung von Lasern durch Theodore Maimann in den 60er-Jahren schuf die Voraussetzungen für die Entwicklung der heute eingesetzten generativen Fertigungsverfahren Selektives Lasersintern und Stereolithografie [22]. Die Anfänge des Lasersinterns gehen auf ein Patent von Pierre Alfred Ciraud [39] aus dem Jahr 1972 zurück. Patentiert wurden damals ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Herstellung beliebiger Gegenstände aus Materialien, die zumindest teilweise schmelzbar sind. Abbildung 2.1 zeigt eine Skizze aus der entsprechenden Offenlegungsschrift. Das dargestellte Verfahren entspricht weitestgehend dem heutigen Lasersintern. Schmelzbare Materialteilchen (2) werden auf eine Matrize (1) aufgebracht und mithilfe eines Wärmestrahlenbündels (3) aufgeschmolzen. Die Strahlen werden so gebündelt, dass sie in der Mitte der Pulverschicht (4) konvergieren. Die von der Strahlung getroffenen Teilchen werden aufgeschmolzen und verbinden sich zu einer kontinuierlichen Schicht (5) [39].

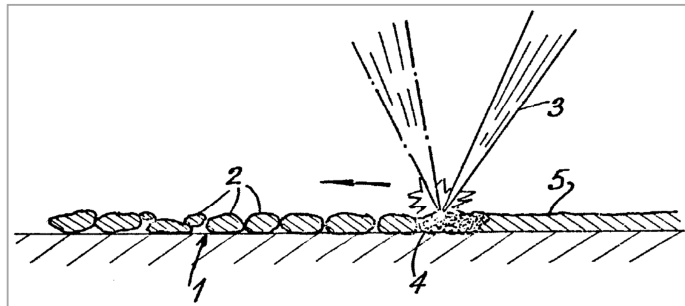


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des von Ciraud zum Patent angemeldeten Lasersinternverfahrens [39]

Householder [40] hat in seinem Patent bereits 1979 eine Maschine beschrieben, die weitestgehend den heutigen Lasersintermaschinen entspricht. Jedoch gelang es ihm damals nicht, einen Markt für seine Erfindung zu erschließen. Carl R. Deckard von der Universität Austin entwickelte das Verfahren und die Maschine von Householder in den 80er Jahren weiter [22]. In einem Patent aus dem Jahr 1989 beschreibt Deckard [41] sein Verfahren und seine Maschine für das Selektive Lasersintern. Die Firmen DTM Corporation und EOS haben das Verfahren 1992 bzw. 1995 kommerziell nutzbar gemacht, indem sie erste Lasersinteranlagen auf den Markt brachten. Seitdem hat sich das schichtweise Verarbeiten von pulverförmigen Materialien mit Lasern immer weiter verbreitet [42] [43]. Das Verfahren zur Verarbeitung von Kunststoffpulvern wird entweder als Lasersintern (LS) oder Selektives Lasersintern (SLS) bezeichnet. Der Name SLS ist treffender, da das Pulver nur an ausgewählten Stellen verfestigt wird [4].

Das SLS von thermoplastischen Kunststoffen wurde in den letzten Jahren kontinuierlich weiterentwickelt. Es hat sich als generatives Fertigungsverfahren, das in naher Zukunft zum Rapid Manufacturing eingesetzt werden kann, etabliert. Kunststoffe nehmen als Ausgangsmaterial eine wichtige Stellung ein, da sie den Verfahrensablauf durch ihren niedrigen Schmelzpunkt und die geringe Wärmeleitfähigkeit begünstigen. Die Verarbeitung von Metallpulvern in einem ähnlichen Verfahren wird als Selektives Strahlschmelzen bzw. Selective Laser Melting (SLM) bezeichnet (siehe Tabelle 2.1). Mittlerweile wird das SLS für bestimmte Anwendungsfälle sogar als Alternative zum Spritzgießen gehandelt. Einer der großen Vorteile dieses Verfahrens ist, dass belastbare Prototypen/Bauteile mit guten mechanischen Eigenschaften bei hoher Fertigungssicherheit und ohne Werkzeugkosten innerhalb weniger Stunden verfügbar sind. Aufgrund dessen sind lasergesinterte Prototypen besonders gut geeignet, um den Produktentstehungsprozess zu verbessern und zu beschleunigen [4] [18] [22] [44] [45]. Im folgenden Abschnitt wird der Lasersinterprozess zunächst grundlegend charakterisiert, bevor in Kapitel 3 detailliert auf einzelne Einflussgrößen eingegangen wird.

### 2.3.1 Charakterisierung Lasersinterprozess

Beim klassischen, nicht generativen Sintern von Metallen verbinden sich nebeneinanderliegende Pulverpartikel durch Diffusionsprozesse, die eine lange Reaktionszeit benötigen. Der Vorgang findet bei hoher Temperatur und unter hohem Druck statt. Die einzelnen Partikel werden dabei nicht aufgeschmolzen. Das generative Lasersintern läuft nicht diffusionsgesteuert und verzichtet auf hohen Druck und lange Reaktionszeiten. Stattdessen werden nebeneinanderliegende Partikel durch thermische Aktivierung aufgeschmolzen [4]. Das Ausgangsmaterial für das Selektive Lasersintern ist wie beim klassischen Sintern pulverförmig (siehe Abschnitt 3.6).

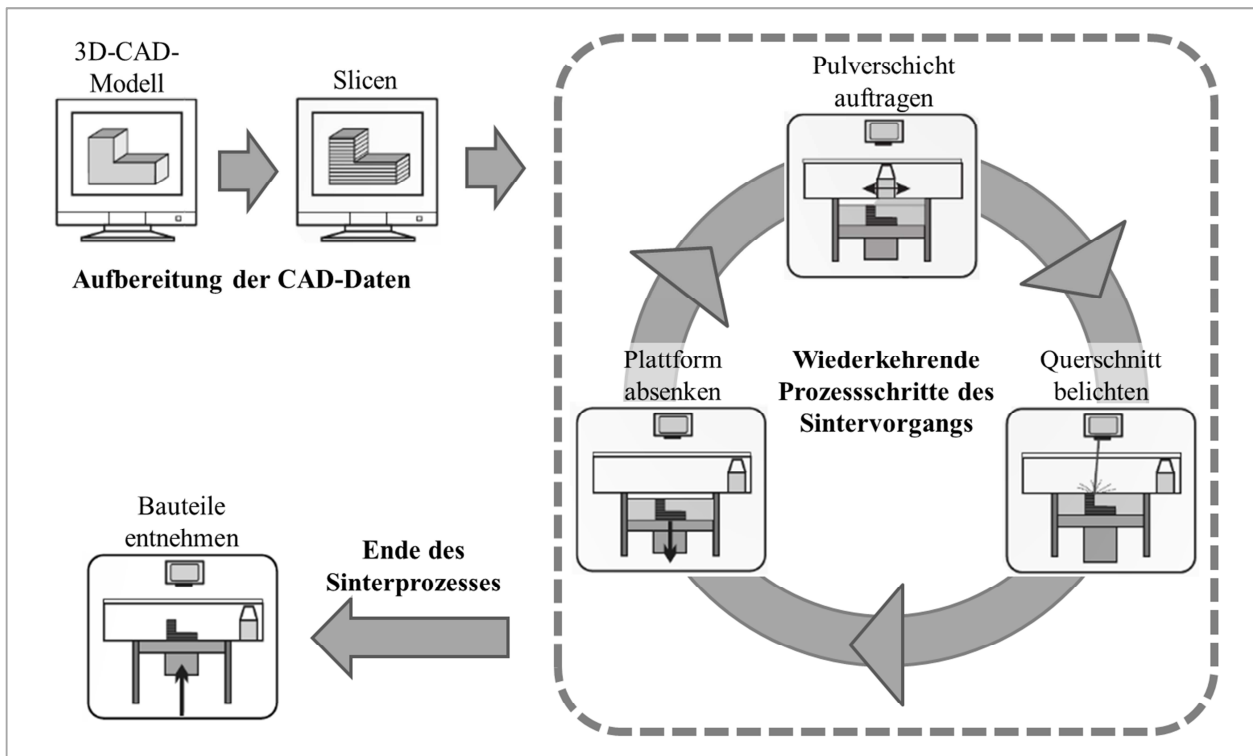


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Lasersinterprozesses gemäß [46]

Im Lasersinterprozess, der in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt ist, wird die Geometrie des späteren Bauteils zeilen- bzw. schichtweise aufgebaut. Vor dem Beginn des eigentlichen Sinterprozesses müssen die 3D-CAD-Daten durch das sogenannte Slicen aufbereitet werden (siehe Abschnitt 3.2). Die Erzeugung jeder Einzelschicht beginnt mit dem Auftrag einer dünnen Pulverschicht, deren Dicke unter Berücksichtigung der Körnung des Pulvers an die Bauteilanforderungen angepasst werden sollte. Der Pulverauftrag erfolgt durch den Wischer (siehe Abbildung 2.3). Jede Pulverschicht hat die Größe der Bauplattform, da der Auftrag ganzflächig erfolgt. Die jeweilige Querschnittsfläche des späteren Bauteils wird in jeder Schicht zeilenweise mithilfe eines Lasers belichtet/gescannt. In den meisten Lasersinteranlagen kommt ein CO<sub>2</sub>-Laser zum Einsatz (siehe Unterabschnitt 3.3). Der Laserstrahl wird im Inneren der Maschine durch einen Umlenkspiegel geführt. Üblicherweise wird die Umrandung der Querschnittsfläche zuerst gescannt. Auf diese Weise entsteht eine möglichst scharfe Randkontur. Erst danach wird die Fläche Zeile für Zeile gefüllt. Die Art und Weise der Führung des Laserstrahls während der Belichtung wird Scan- oder Belichtungsstrategie genannt (siehe Unterabschnitt 3.4.3). Sowohl die Scanstrategie als auch Parameter wie beispielsweise Vorschubgeschwindigkeit und Zeilenabstand können in der Maschinensoftware verändert werden und haben Einfluss auf die Eigenschaften des späteren Bauteils (siehe Unterabschnitt 3.4). Das Pulver, das außerhalb der Geometrie des Bauteils liegt, wird nicht aufgeschmolzen.

Es verbleibt im Bauraum und dient als Stützmaterial für nachfolgende Schichten. Nachdem die Querschnittsfläche der aktuellen Schicht vollständig abgezeilt wurde, wird die Bauplattform um die Schichtdicke abgesenkt, und der Wischer trägt eine neue Pulverschicht auf. Der Vorgang aus Pulverauftrag, Scannen und Absenken der Bauplattform wird solange wiederholt, bis alle Bauteile, die im Bauraum der Maschine angeordnet wurden, fertiggestellt sind [6] [22] [47]. Die zuvor erwähnten Komponenten einer Lasersinteranlage sind Abbildung 2.3 dargestellt.

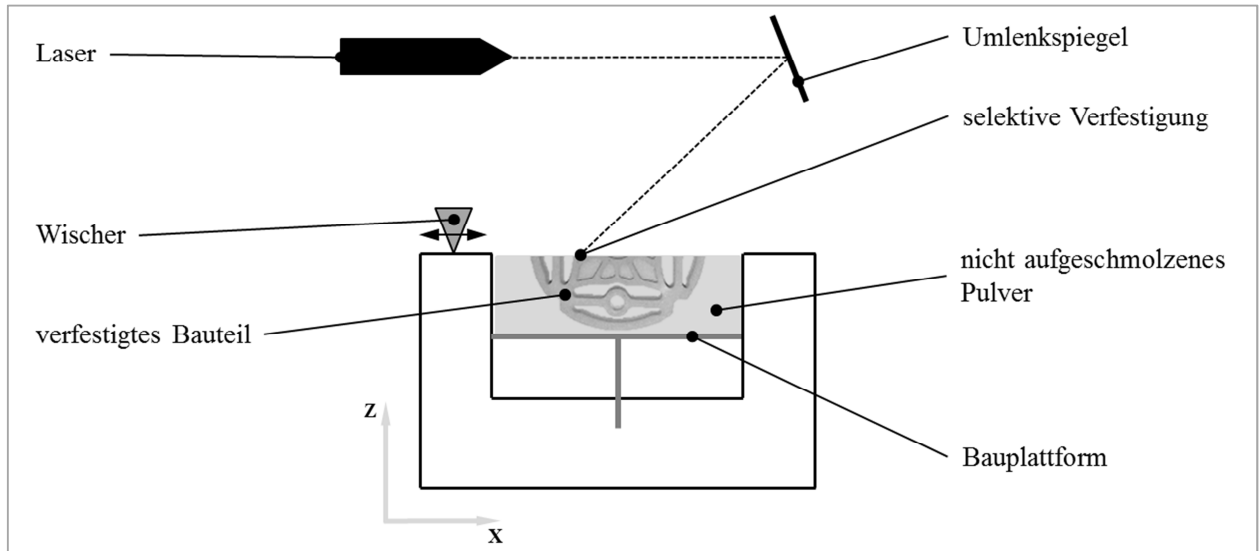
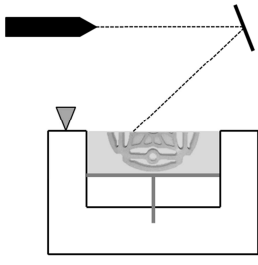
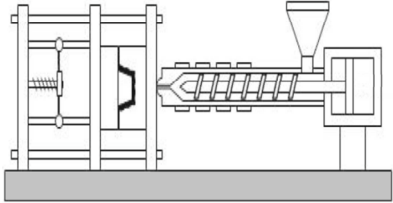


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der wichtigsten Komponenten einer Lasersinteranlage gemäß [22]

## 2.4 Prozessvergleich Lasersintern und Spritzgießen

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass lasergesinterte und spritzgegossene Kunststoffbauteile, die aus dem gleichen thermoplastischen Polymer hergestellt werden, sowohl mikro- als auch makroskopisch voneinander abweichende Eigenschaften besitzen. Der Grund hierfür sind die zwei grundsätzlich unterschiedlichen Fertigungsprozesse (siehe Tabelle 2.3). Die Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen durch SLS und Spritzgießen (SG) unterscheidet sich sowohl in der Art des Auf- und Verschmelzens als auch in der Art des Erstarrens der Makromoleküle. Beim SG wird das spätere Bauteil aus einem Granulat, das vollständig aufgeschmolzen und unter hohem Druck in ein Werkzeug eingespritzt wird, hergestellt. Im Vergleich dazu wird ein Lasersinterbauteil durch örtliches Aufschmelzen von Pulverkörnern nach dem Schichtbauprinzip bei Atmosphärendruck hergestellt [32] [48]. Die aus den Fertigungsverfahren resultierende Abkühlgeschwindigkeit der Bauteile unterscheidet sich erheblich voneinander. Spritzgießteile erstarren in korrekt temperierten Werkzeugen innerhalb von Sekunden und kühlen anschließend bei Umgebungstemperatur rasch ab, wohingegen der Abkühlvorgang von lasergesinterten Bauteilen mehrere Stunden dauern kann (siehe Unterabschnitt 3.4.6) [16]. Bei der Auslegung der Temperierung von Spritzgießwerkzeugen muss grundsätzlich beachtet werden, dass teilkristalline Werkstoffe beim Abkühlen im Bereich der Kristallitschmelztemperatur einen zusätzlichen Phasenübergang durchlaufen, der bei amorphen Kunststoffen nicht vorhanden ist. Kristallisation ist ein exothermer Vorgang, der dazu führt, dass beim Erstarren eine zusätzlich abzuführende Wärmemenge vorhanden ist, die bei der Auslegung der Werkzeugtemperierung berücksichtigt werden muss (siehe Abbildung 2.4) [49]. Beim SLS kann die beim Erstarren von teilkristallinen Kunststoffen frei werdende Kristallisationsenthalpie gezielt genutzt werden, um die Temperatur des gesamten Pulverblocks möglichst lange auf Höhe der Kristallisationstemperatur zu halten (siehe Unterabschnitt 3.4.6) [50].

Tabelle 2.3: Prozessvergleich Lasersintern und Spritzgießen gemäß [9] [22] [28] [51] [52]

	Selektives Lasersintern (SLS)	Spritzgießen (SG)
		
Werkstoffgruppe	Thermoplaste	Thermoplaste
Ausgangsmaterial	Pulver	Granulat
Körnung	ca. 60 µm	wenige Millimeter
Materialkosten	50 bis 300 €/kg	1 bis 80 €/kg
Materialkosten PA 12	50 bis 100 €/kg	1 bis 3 €/kg
Materialvielfalt	begrenzt	sehr groß
Aufschmelzung des Ausgangsmat.	selektiv	vollständig
Formgebung	durch selektives Aufschmelzen	durch Einspritzen in eine Negativform
Energiezufuhr	Laser, elektrische Heizung	elektrische Heizung, Reibungswärme
Druck bei der Formgebung	Umgebungsdruck	400 bis 1800 bar *
Schergeschw. bei d. Formgebung	keine	hoch ( $10^3$ bis $10^4$ s <sup>-1</sup> )
Fertigungszeit	mehrere Stunden	wenige Sekunden
Abkühlzeit	mehrere Stunden	wenige Sekunden bis einige Minuten
Zykluszeit	mehrere Stunden	wenige Sekunden bis einige Minuten
Fließfrontgeschwindigkeit	keine	20 bis 200 cm/s
Werkzeugkosten	keine	hoch bis sehr hoch
Thermische Bel. d. Ausgangsmat.	hoch	gering
Anteil Altmaterial	hoch	gering

\* der Einspritzdruck bei der volumenstromgesteuerten Formfüllung ist bauteil-, werkstoff- und prozessabhängig

Für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit diskutierten Zusammenhänge ist ein grundsätzliches Verständnis des Verhaltens von thermoplastischen Kunststoffen notwendig. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt zunächst auf das Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen im Allgemeinen eingegangen, bevor in Abschnitt 2.6 das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von lasergesintertem und spritzgegossenem Polyamid grundlegend charakterisiert wird.

## 2.5 Charakterisierung des Werkstoffverhaltens von Thermoplasten

Thermoplaste bestehen aus einzelnen Molekülketten (Makromolekülen), die nebeneinanderliegen oder ineinander verschlungen sind. Jedes dieser Makromoleküle besteht aus sehr vielen, meist kettenförmig aneinandergereihten Monomeren [2] [53]. Innerhalb der Makromoleküle sind die einzelnen Atome durch feste kovalente Bindungen verknüpft. Dies gilt sowohl für die ursprünglichen Bindungen innerhalb des Monomers als auch für die Bindungen, die bei der Polymersynthese zwischen den Monomeren entstehen. Die kovalente Bindung zeichnet sich durch eine sehr hohe Bindungsenergie aus. Sie beträgt bei einer aliphatischen C – C Einfachbindung beispielsweise 347 kJ/mol [53] [54]. Der Zusammenhalt der Thermoplaste beruht allerdings im Wesentlichen nicht auf der kovalenten Bindung, sondern auf den schwächeren Nebenvalenzkräften, die nebeneinanderliegende Makromoleküle aufeinander ausüben. Unterstützt werden diese von den Verschlaufungen der ineinander verschlungenen Kettenmoleküle [55].

### Nebenvalenzkräfte

Die Bindungsenergien der verschiedenen Nebenvalenzkräfte sind erheblich geringer als die der kovalenten Bindung (siehe Tabelle 2.4). Dennoch beeinflussen sie die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Polymere entscheidend [55]. Mit steigendem Abstand zwischen den Makromolekülen nimmt die Bindungsenergie der Nebenvalenzkräfte jedoch sehr stark ab. Die Änderung der Energie ist dabei proportional zur n-ten Potenz des Abstandes ( $r$ ), wobei  $n$  eine Konstante ist, die je nach Art der Nebenvalenzkraft andere Werte annimmt [56]. Für  $n$  sind in der Literatur teilweise unterschiedliche Werte angegeben (siehe Tabelle 2.4).

Tabelle 2.4: Bindungsenergien der verschiedenen Nebenvalenzkräfte gemäß [53] [55] [56] [57]

Bezeichnung	Bindungsenergie ( $W_{An}$ )	Abhängigkeit
Dispersionskräfte	2 – 10 kJ/mol	$W_{An\_Dis} \sim \frac{1}{r^6}$
Dipolkräfte	$\approx 10$ kJ/mol	$W_{An\_Dipol} \sim \frac{1}{r^4}; \frac{1}{r^6}$
Wasserstoffbrückenbindung	20 – 40 kJ/mol	$W_{An\_WB} \sim \frac{1}{r^4}$
Ionenbindung	$\approx 250$ kJ/mol	$W_{An\_Ion} \sim \frac{1}{r}; \frac{1}{r^3}$

Da der Werkstoffzusammenhalt von Polymeren auf den schwächeren Nebenvalenzkräften beruht, kann es unter der Einwirkung einer äußeren Belastung passieren, dass die Verbindung zwischen den Ketten aufgebrochen wird und Molekülketten aneinander abgleiten. Der Werkstoff wird plastisch verformt [2]. Durch diese Art des Werkstoffzusammenhalts ergeben sich spezielle Werkstoffeigenschaften, die von vielen Faktoren beeinflusst werden. Im weiteren Verlauf wird auf folgende Faktoren näher eingegangen:

- Temperatur (siehe Unterabschnitt 2.5.1 auf Seite 17)
- Wasseraufnahme (siehe Unterabschnitt 2.5.2 auf Seite 21)
- Belastungszustand (siehe Unterabschnitt 2.5.3 auf Seite 22)

#### 2.5.1 Temperatur

Bei erhöhter Temperatur führen die Molekülketten verstärkt Schwingungen aus, die eine Vergrößerung des freien Volumens und damit eine Erhöhung des Molekülkettenabstandes zur Folge haben. Durch die damit verbundene Verringerung der Nebenvalenzkräfte (siehe Tabelle 2.4) sinken die Steifigkeit und Festigkeit von Thermoplasten mit steigender Temperatur [2]. Das temperaturabhängige Verhalten von thermoplastischen Polymeren kann anhand von drei charakteristischen Phasenumwandlungstemperaturbereichen erläutert werden. Folgende Temperaturbereiche werden unterschieden:

- Glasübergangstemperaturbereich
- Kristallisationstemperaturbereich
- Schmelztemperaturbereich
- Zersetzungstemperaturbereich

Die Lage der genannten Temperaturbereiche kann mithilfe der Dynamischen Differenzkalorimetrie bestimmt werden. Im Englischen wird dieses Verfahren Differential Scanning Calorimetry (DSC) genannt.

Bei der DSC wird das kalorische Verhalten einer Polymerprobe im Vergleich zu einer Referenzprobe untersucht. Kalorische Effekte in Polymerwerkstoffen zeigen sich durch eine sprunghafte Änderung der spezifischen Wärmekapazität (Glasübergang) oder durch endotherme bzw. exotherme Umwandlungsprozesse (Schmelzen, Kristallisation, Zersetzen) [58]. Die genaue Funktion der DSC wird in [58] ausführlich dargestellt. Abbildung 2.4 zeigt den prinzipiellen Verlauf einer DSC-Messkurve eines teilkristallinen Thermoplasten. In der Kurve sind die auftretenden Effekte schematisch dargestellt und entsprechend gekennzeichnet.

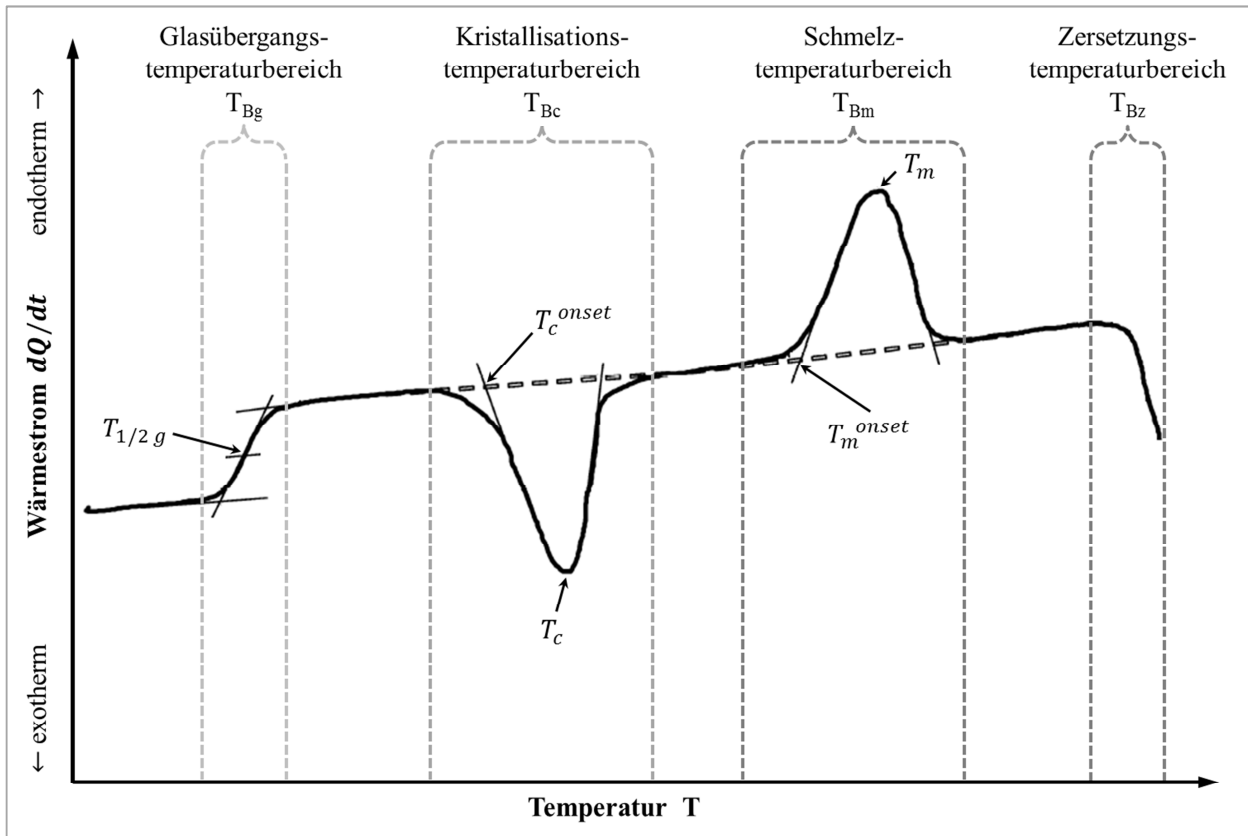


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung einer DSC-Messkurve gemäß [58] [59]

### Glasübergangsbereich

In amorphen Thermoplasten bzw. in den amorphen Bereichen teilkristalliner Werkstoffe findet im Glasübergangsbereich ( $T_{Bg}$ ) der Übergang vom energie- zum entropieelastischen Zustand statt (siehe Abbildung 2.5). Dieser Bereich wird auch Einfrier- oder Erweichungsbereich genannt. Der Glasübergangsbereich wird in den meisten Fällen durch einen einzelnen Temperaturwert, die Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) gekennzeichnet [43] [60]. Zur Bestimmung von  $T_g$  können gemäß DIN EN ISO 11357-2 [61] unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden. Eines davon ist das sogenannte Halbstufenhöhenverfahren. Bei der Verwendung dieses Verfahrens ist dem Glasübergang die Temperatur  $T_{1/2g}$  zuzuordnen (siehe Abbildung 2.4). Unterhalb von  $T_g$  sind amorphe Bereiche spröde und steif. Sie weisen einen glasähnlichen Zustand auf. Es liegt keine Kettensegmentbeweglichkeit vor. Die Moleküle können lediglich um ihre Gleichgewichtslage schwingen. Der energieelastische Bereich ist dadurch gekennzeichnet, dass sich die Makromoleküle unter Belastung elastisch verformen und nach Entlastung wieder vollständig zurückverformen, da ihre Ausgangslage energetisch am günstigsten ist. Das beschriebene Verhalten wird Energieelastizität genannt. Mit dem Erreichen von  $T_g$  und dem Übergang zum entropieelastischen Zustand setzt die mikrobrownsche Bewegung von Seitenketten und Kettensegmenten ein. Kettensegmente werden

vermehrt umgelagert und in Rotationen versetzt. Um die Bewegung der Ketten zu ermöglichen, muss ausreichend freies Volumen in der Struktur des Polymers vorhanden sein. Den Erweichungsbereich gibt es sowohl in vollständig amorphen Thermoplasten als auch in den amorphen Phasen von teilkristallinen Werkstoffen. Bei weiterer Erwärmung gehen die amorphen Phasen oberhalb des entropieelastischen Bereichs in den Fließbereich über (siehe Abbildung 2.5). In teilkristallinen Thermoplasten liegen oberhalb von  $T_g$  entropieelastische und energieelastische, kristalline Bereiche vor (siehe Abbildung 2.6) [5] [43] [53] [62] [63].

### **Schmelztemperaturbereich bzw. Kristallitschmelzbereich und Kristallisationstemperaturbereich**

Im Schmelztemperaturbereich ( $T_{Bm}$ ) findet der Übergang vom entropieelastischen in den schmelzflüssigen Zustand statt. Die Peak-Temperatur des Schmelzbereichs ( $T_{pm}$ ) wird Schmelztemperatur ( $T_m$ ) genannt (siehe Abbildung 2.4). Der Schmelztemperaturbereich bzw. der Kristallitschmelzbereich kennzeichnet das Aufschmelzen der kristallinen Bereiche. Dieser Vorgang beginnt bei weiterer Temperaturerhöhung, nachdem die amorphen Bereiche, für die keine Schmelztemperatur definiert ist, vollständig erweicht sind. Die brownischen Molekülbewegungen sind in diesem Temperaturbereich so groß, dass auch die Molekülketten in den kristallinen Bereichen beweglicher werden und aneinander abgleiten, da die intermolekularen Kräfte und Wechselwirkungen aufgrund des vergrößerten Molekülabstands stark abgenommen haben (siehe Tabelle 2.4). Das Abgleiten der Molekülketten, das durch eine Schwerpunktverlagerung gekennzeichnet ist, wird als makrobrownsche Bewegung bezeichnet. Oberhalb der Kristallitschmelztemperatur ist der gesamte Thermoplast zähflüssig. Bei der Abkühlung muss beim Kristallisieren die zusätzlich frei werdende Kristallisationswärme abgeführt werden. Dies führt dazu, dass die Kristallisationstemperatur ( $T_c$ ) unterhalb der Schmelztemperatur liegt. Die Kristallisationstemperatur ist die Peak-Temperatur des Kristallisationsbereichs (siehe Abbildung 2.4) [5] [43] [48] [53].

### **Zersetzungstemperaturbereich**

Wird eine thermoplastische Schmelze immer weiter erwärmt, so beginnen ab einer bestimmten Temperatur irreversible Vorgänge. Dieser Temperaturbereich wird Zersetzungsbereich ( $T_{Bz}$ ) genannt (siehe Abbildung 2.4). Der Energieeintrag muss sowohl beim SG als auch beim SLS so gewählt werden, dass die Temperatur der Schmelze niemals bis in den Zersetzungstemperaturbereich des jeweiligen Werkstoffs ansteigt [43] [53].

### **Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften**

Mithilfe der erläuterten Phasenumwandlungstemperaturen können die mechanischen Eigenschaften von thermoplastischen Werkstoffen und die daraus resultierenden Gebrauchstemperaturen definiert werden. Das elastische Verhalten von Polymeren wird durch die reversible Verformung der Makromoleküle bestimmt. Die plastische Verformung hingegen beruht grundsätzlich auf dem Abgleiten von Molekülketten. Dieser Vorgang ist zeit- und temperaturabhängig. Im Gegensatz zu Metallen verfestigen Polymere bei kleiner plastischer Verformung nicht, da beim Abgleiten der Molekülketten keine neuen Hindernisse entstehen [63]. Die nicht vorhandene Verfestigung bei kleinen plastischen Dehnungen muss bei der Simulation von mehrmaligen Be- und Entlastungsvorgängen an Kunststoffteilen berücksichtigt werden. Die Verwendung eines Materialmodells mit kinematischer oder isotroper Verfestigung, wie es bei der Simulation von Metallbauteilen üblich ist, führt zu entsprechenden Fehlern. Zur Simulation derartiger Vorgänge sollten viskoelastische bzw. viskoplastische Materialmodelle verwendet werden (siehe Tabelle 6.1). Durch die Wärme, die bei der Umformung entsteht, kommt es bei Thermoplasten sogar zu einer lokalen



Entfestigung. Erst bei größeren plastischen Verformungen tritt eine Verfestigung auf, da sich die Kettenmoleküle in Spannungsrichtung orientieren. Die genaue Betrachtung des plastischen Verhaltens muss für amorphe und teilkristalline Thermoplaste getrennt erfolgen [63]. In Abbildung 2.5 ist die Temperaturabhängigkeit der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung eines amorphen Thermoplasten schematisch dargestellt.

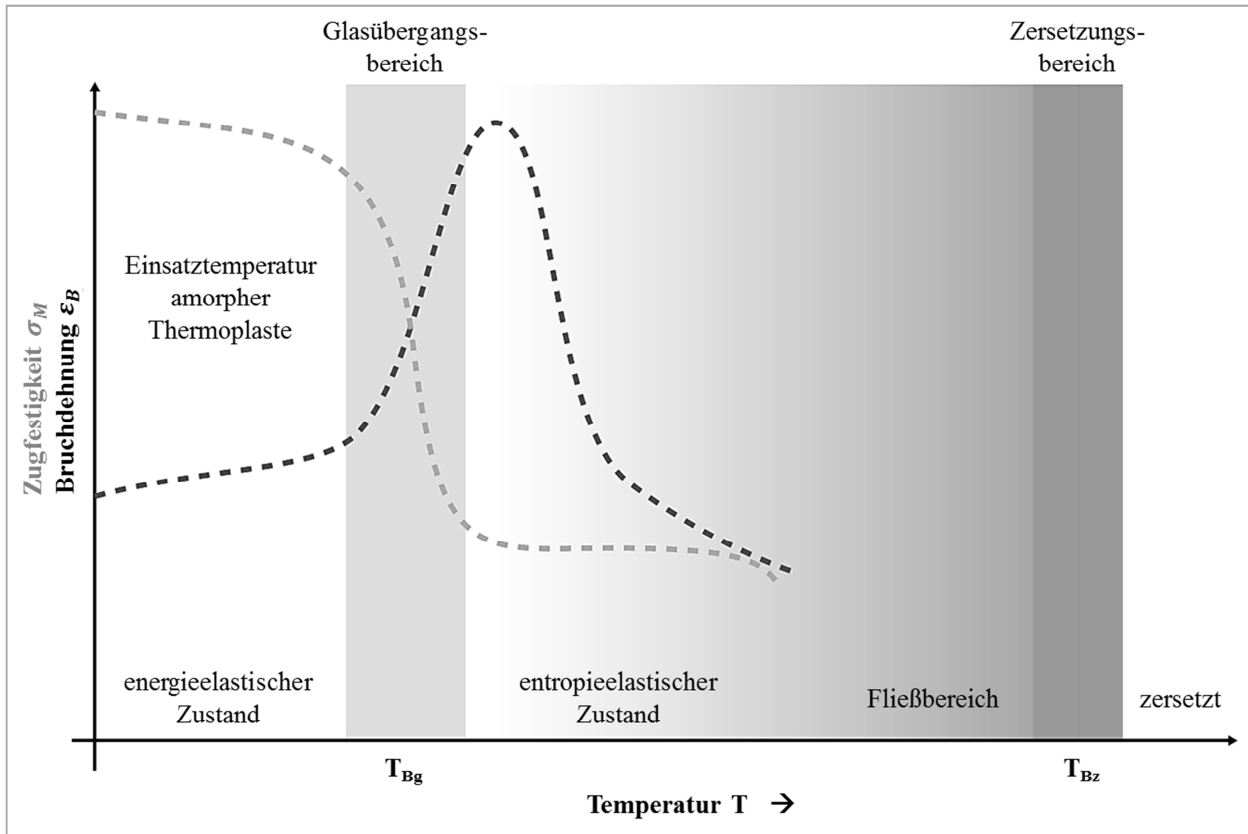


Abbildung 2.5: Festigkeits- und Verformungsverhalten eines amorphen Thermoplasten gemäß [5] [53]

Die Abbildung zeigt, dass die Festigkeit im Glasübergangstemperaturbereich ( $T_{Bg}$ ) signifikant abfällt. Im Gegensatz dazu steigt die Bruchdehnung stark an. Für teilkristalline Thermoplaste ergeben sich die in Abbildung 2.6 dargestellten Kurvenverläufe. Im Glasübergangstemperaturbereich ( $T_{Bg}$ ) stellt sich eine erste Verringerung des E-Moduls und der Festigkeit ein, da die amorphen Bereiche erweichen. Der Werkstoffzusammenhalt ist jedoch weiterhin gegeben, da sich eine Polymerkette in der Regel über mehrere amorphe und kristalline Bereiche erstreckt [63]. Der quantitative Einfluss der Erweichung hängt dabei vom Kristallisationsgrad ab. Je höher der Kristallisationsgrad, desto geringer das Absinken der Kennwerte [53]. Die zweite signifikante Änderung der mechanischen Eigenschaften tritt im Schmelztemperaturbereich ( $T_{Bm}$ ) auf. Hier sinken die Steifigkeit und Festigkeit der kristallinen Bereiche erheblich, da sie in den schmelzflüssigen Zustand übergehen.

In teilkristallinen Phasen sind die intermolekularen Bindungen wegen des geringen Molekülabstands stärker ausgeprägt als in amorphen. Dies führt zu einer höheren Steifigkeit und Festigkeit dieser Bereiche. Unter Belastung werden zunächst die amorphen Bereiche in teilkristallinen Thermoplasten in Belastungsrichtung ausgerichtet und gestreckt. Bei weiter steigender Dehnung ordnen sich die kristallinen Bereiche zunächst in Belastungsrichtung an, bevor sie sich in Blöcke auflösen und aneinander abgleiten. Das Werkstoffversagen tritt durch Fließen bei gleichzeitig großer Einschnürung ein. Problematisch bei teilkristallinen Thermoplasten ist, dass eventuell vorhandene Verunreinigungen bei der Kristallisation in den amorphen Bereichen konzentriert werden. Dies hat zur Folge, dass die amorphen Bereiche zusätzlich

geschwächt werden. Aus diesem Grund entstehen unter Belastung an den Grenzflächen der Sphärolithe zahlreiche Brüche. Die Brüche verlaufen vorzugsweise senkrecht zur Belastungsrichtung [2] [63].

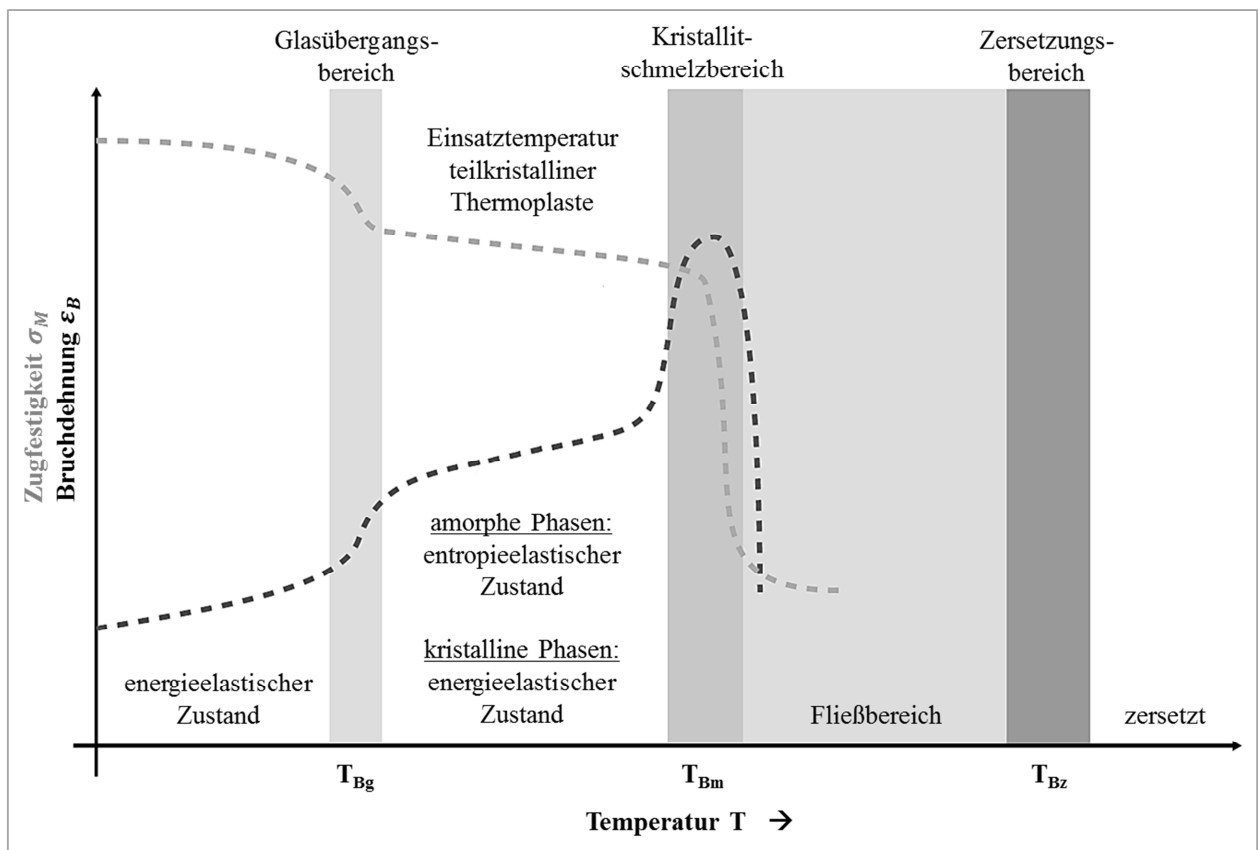


Abbildung 2.6: Festigkeits- und Verformungsverhalten eines teilkristallinen Thermoplasten gemäß [5] [53]

Aufgrund der erläuterten Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von Thermoplasten werden sowohl die Werkstoffprüfungen zur Charakterisierung der Materialeigenschaften (siehe Kapitel 5) als auch die Bauteilprüfungen zur Verifikation von Simulationsergebnissen (siehe Kapitel 6) und zur Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs (siehe Kapitel 7) bei konstanten Temperaturbedingungen durchgeführt. Auf diese Weise ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sichergestellt.

### 2.5.2 Wasseraufnahme

Die Fähigkeit zur Feuchtigkeitsaufnahme hängt grundsätzlich von der Polarität der Polymere ab. Sie ergibt sich durch die polare Struktur der Wassermoleküle und deren Affinität zu polaren Gruppen im Makromolekül. Unpolare Polymere nehmen sehr wenig bis gar keine Feuchte auf, wohingegen polare Polymere und – in hohem Maße – die Polyamide zur Feuchtigkeitsaufnahme neigen. Bei Polyamiden wird die Wasseraufnahme durch das Vorhandensein von Wasserstoffbrückenbindungen begünstigt und steht in direktem Zusammenhang mit der Häufigkeit aufeinanderfolgender Amidgruppen im Makromolekül (siehe Abschnitt 4.2). Darüber hinaus können hydrophile Zusatzstoffe die Neigung zur Wasseraufnahme erhöhen. Die Einlagerung der Wassermoleküle erfolgt durch Diffusion. Sie lagern sich vorwiegend in den amorphen Bereichen an, da diese im Vergleich zu den kristallinen eine geringere Dichte aufweisen. Deshalb wird die prozentuale Gewichtszunahme durch Wasseraufnahme bei gleichen Lagerbedingungen auch durch den Kristallisationsgrad beeinflusst. Wasseraufnahme führt immer zu einer Änderung der Eigenschaften und zur Quellung von Polyamiden. Aus diesem Grund muss sie bei der Verwendung berücksich-

tigt werden [54] [64]. Die Änderung der Eigenschaften durch Wasseraufnahme ist reversibel. Ihre Ausprägung ist von den Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit abhängig [22]. Um reproduzierbare und vergleichbare Versuchsergebnisse zu bekommen, müssen alle Untersuchungen bei einheitlichen Umgebungsbedingungen und einem definierten Feuchtegehalt durchgeführt werden. Der definierte Feuchtegehalt wird durch Konditionieren erreicht [65]. Die Vorbehandlung der in dieser Arbeit verwendeten Probekörper und Bauteile wird in Abschnitt 4.4 erläutert.

Die Glasübergangstemperatur verschiebt sich durch Feuchtigkeitsaufnahme zu tieferen Temperaturen. Zusätzlich nimmt die Zähigkeit des Materials zumindest bis zum luftfeuchten Zustand zu. Die Steifigkeit und Festigkeit hingegen nehmen ab. Durch Feuchtigkeitsänderungen kann es dazu kommen, dass die mechanischen Eigenschaften über den Proben- oder Bauteilquerschnitt variieren. Aus den genannten Gründen muss bei Kennwerten von Polyamiden immer der Feuchtigkeitsgehalt der Probekörper, mit deren Hilfe sie ermittelt wurden, angegeben werden [9] [53] [54]. Dies ist in der Praxis jedoch nicht immer der Fall. Insbesondere in den Datenblättern von Sintermaterialien fehlt diese Angabe häufig (siehe Unterabschnitt 4.2.2). Laut Breuninger [22] beziehen sich die Angaben in den Datenblättern der Pulverhersteller in der Regel auf vorgetrocknete Materialien. Die absolute Änderung der mechanischen Eigenschaften von Sinterpolyamiden durch Feuchtigkeitsaufnahme wurde bisher allerdings noch nicht genauer untersucht. Breuninger [22] geht jedoch von einem geringen Einfluss aus. Die Ergebnisse zur grundlegenden Charakterisierung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens in Unterabschnitt 2.6.4 auf Seite 30 zeigen, dass die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 unterschiedlich stark durch die Feuchtigkeitsaufnahme beeinflusst werden. Folglich wird der Einfluss der Wasseraufnahme in Abschnitt 5.3 anhand der Ergebnisse von Zugversuchen ausführlich diskutiert. Die Kenntnis des quantitativen Feuchtigkeitseinflusses ist für den effektiven Einsatz von lasergesinterten Bauteilen im Entwicklungsprozess von Spritzgießbauteilen zwingend erforderlich. Darüber hinaus wird in Abschnitt 5.3 analysiert, warum der Einfluss der Wasseraufnahme auf die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 unterschiedlich stark ausgeprägt ist.

### 2.5.3 Belastungszustand

Als belastungsspezifische Faktoren gelten klimatische und mechanische Belastungen [48]. Die wichtigsten klimatischen Faktoren Temperatur und Feuchte wurden in den vorangegangenen Unterkapiteln bereits separat behandelt. Deshalb wird an dieser Stelle lediglich auf die mechanischen Faktoren eingegangen. Der mechanische Belastungszustand eines Bauteils ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Belastungsart
- Belastungsdauer
- Belastungsgeschwindigkeit

Die Kenntnis des Belastungszustands ist sowohl für die Durchführung von Struktursimulationen (siehe Kapitel 6) als auch für die Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs (siehe Kapitel 7) wichtig, damit Randbedingungen und Materialmodelle belastungsgerecht definiert und Versuchsergebnisse richtig interpretiert und bewertet werden können. Die Bedeutung der einzelnen beanspruchungsspezifischen Faktoren wird nachfolgend erläutert.

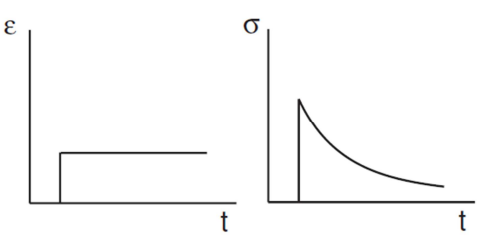
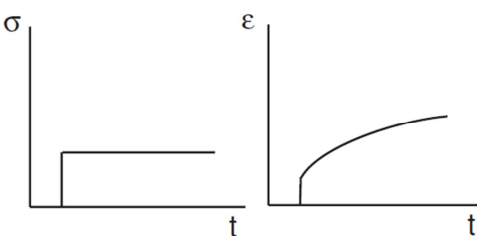
### **Belastungsart**

Hinsichtlich der Belastungsart werden verschiedene Lastfälle unterschieden. Grundsätzlich muss zwischen kurzzeitigen, langzeitigen und dynamischen Belastungen differenziert werden. Kurzzeitige Belastungen können zusätzlich in einmalige und mehrmalige Belastungen unterteilt werden [2]. Die Unterscheidung der verschiedenen Belastungsarten ist bei der Durchführung von Struktursimulationen von großer Bedeutung, da sie die Wahl des Materialmodells beeinflusst (siehe Unterabschnitt 6.2.1).

### **Belastungsdauer**

Thermoplastische Kunststoffe verhalten sich nicht elastisch, sondern viskoelastisch. Ihr Verhalten ist von der Dauer der Belastung abhängig [2]. Sowohl bei der Planung und Durchführung von Werkstoff- und Bauteilprüfungen als auch bei der Erstellung von Materialmodellen muss das viskoelastische Materialverhalten von Kunststoffen berücksichtigt werden. Bei Stoßbelastung verhalten sich viele Polymere annähernd linear elastisch und versagen spröde und verformungslos. Deshalb werden derartige Bauteilbelastungen häufig unter Zuhilfenahme von linear elastischen Materialmodellen simuliert (siehe Tabelle 6.1). Bei langzeitigen Belastungen hingegen reagieren Kunststoffe zäh und viskoelastisch [48]. Das viskoelastische Verhalten lässt sich durch das Vorhandensein von freiem Volumen und den speziellen Werkstoffzusammenhalt, der hauptsächlich auf Nebenvalenzkräften beruht, erklären. Die Bewegung der Molekülketten wird durch die Nebenvalenzkräfte und die gegenseitigen Verschlaufungen behindert, aber nicht vollständig verhindert, sodass diese zeitabhängig aneinander abgleiten können. Das zeitabhängige Abgleiten der Molekülketten ist für den Effekt der Spannungsrelaxation verantwortlich. Durch eine sprunghaft von außen aufgebrachte Dehnung werden die Molekülketten im ersten Moment elastisch gespannt. Wird die Dehnung über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten, so haben die Molekülketten Zeit, um aneinander abzugleiten. Dies führt zu einer Verringerung der Spannung im Material [2]. Der beschriebene Effekt ist in Tabelle 2.5 in der linken Spalte qualitativ dargestellt. Aufgrund dieses Verhaltens ist die Spannung, die in einem viskoelastischen Werkstoff wirkt, immer eine Funktion von Belastungsdauer, Belastungsgeschwindigkeit und Einsatztemperatur. Auch die zulässigen Spannungen ändern sich mit den gerade genannten Einflussgrößen [66]. Das zeitabhängige Abgleiten der Molekülketten ist für einen weiteren Effekt verantwortlich, der Retardation oder Kriechen genannt wird. Wird ein Thermoplast mit einer Spannung belastet, die über einen längeren Zeitraum konstant gehalten wird, so schreitet die Verformung immer weiter fort, da die Molekülketten aneinander abgleiten [2]. Dieser Effekt ist in Tabelle 2.5 in der rechten Spalte qualitativ dargestellt.

Tabelle 2.5: Relaxation und Retardation eines viskoelastischen Stoffs [67]

Relaxation	Retardation
 <p style="text-align: center;"><math>\varepsilon = const.</math></p>	 <p style="text-align: center;"><math>\sigma = const.</math></p>

Es gibt verschiedene Ansätze zur Beschreibung der linearen Viskoelastizität mithilfe von Analogie betrachtungen zum Verformungsverhalten von idealisierten Feder-Dämpfer-Modellen. Diese Analogiebe-

trachtungen erleichtern das Verständnis des Verformungsverhaltens und ermöglichen dessen mathematische Beschreibung [67]. Eines dieser Modelle, dessen Verhalten qualitativ dem Verhalten realer Materialien mit linear viskoelastischen Eigenschaften entspricht, ist das 4-Elemente- bzw. Burgers-Modell.

#### 4-Elemente- bzw. Burgers-Modell

Durch die Kombination von zwei Federn und zwei Dämpfern beschreibt das 4-Elemente-Modell das zeitabhängige, viskoelastische Verhalten eines Werkstoffs, bei dem sich die Gesamtverformung gemäß Gleichung (2.1) berechnen lässt und sich aus elastischen ( $\varepsilon_0$ ), viskosen ( $\varepsilon_{v(t)}$ ) und relaxierenden ( $\varepsilon_{rel(t)}$ ) Anteilen zusammensetzt. Sowohl der viskose als auch der relaxierende Dehnungsanteil sind zeitabhängig. Zusätzlich sind alle Parameter des Modells mit Ausnahme des  $E_0$ -Moduls temperatur- und spannungsabhängig. Der  $E_0$ -Modul ist nur temperaturabhängig [67].

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ges}(t,\sigma,T) &= \varepsilon_0(\sigma,T) + \varepsilon_v(t,\sigma,T) + \varepsilon_{rel}(t,\sigma,T) \\ \varepsilon_{ges}(t,\sigma,T) &= \frac{\sigma}{E_0(T)} + \frac{\sigma}{\eta_0(\sigma,T)} \cdot t + \frac{\sigma}{E_{rel}(\sigma,T)} \cdot (1 - e^{-t/\tau(\sigma,T)})\end{aligned}\quad (2.1)$$

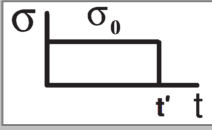

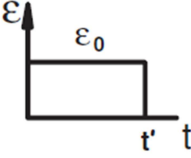

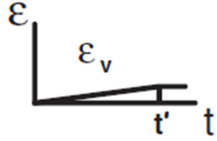

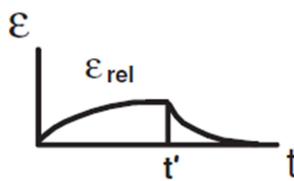
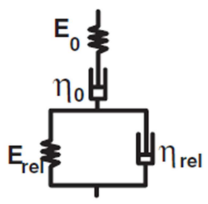
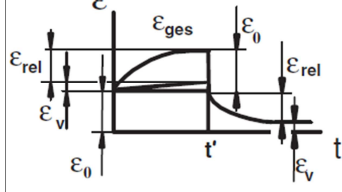
mit:

- $\sigma$  = aufgebrachte Spannung
- $T$  = Temperatur
- $t$  = Zeit
- $E_0$  = Federsteifigkeit der elastischen Feder des Maxwell-Elements
- $\eta_0$  = Viskosität des Dämpfers des Maxwell-Elements
- $E_{rel}$  = Federsteifigkeit der elastischen Feder des Voigt-Elements
- $\tau$  = Relaxationszeit (siehe Tabelle 2.6)

Mithilfe des 4-Elemente- bzw. Burgers-Modells können die Kriech-, Dehnungs- und Spannungsrelaxationsvorgänge innerhalb des linear viskoelastischen Bereichs (siehe Abbildung 6.1 auf Seite 142) dargestellt werden. Die Unterscheidung der drei Dehnungsanteile ist für die Beschreibung des Verformungsverhaltens bei Be- und Entlastung erforderlich. Das Modell besteht aus der Reihenschaltung einer elastischen Feder mit der Federsteifigkeit  $E_0$  und einem newtonschen Dämpfer mit der Dämpfungviskosität  $\eta_0$ , die den elastisch-viskosen Verformungsanteil abbilden. Die Reihenschaltung dieser beiden Elemente wird auch Maxwell-Element genannt. In Reihe zu diesem Maxwell-Element befindet sich eine Parallelschaltung von einer weiteren elastischen Feder mit der Federsteifigkeit ( $E_{rel}$ ) und einem zeitabhängig viskosen Dämpfer mit der Dämpfungviskosität  $\eta_{rel}$ , die den relaxierenden Anteil der Verformung abbilden. Die parallel geschalteten Elemente werden auch als Voigt-Element bezeichnet [67].

In Tabelle 2.6 ist die Beschreibung des Verformungsverhaltens von Kunststoffen mit dem 4-Elemente-Modell dargestellt. Bei Belastung mit einer Spannung  $\sigma_0$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird die elastische Feder  $E_0$  elastisch gedehnt. Der viskose newtonsche Dämpfer mit der Viskosität  $\eta_0$  wird bei Aufrechterhaltung der Spannung  $\sigma_0$  zeitabhängig linear gestreckt. Das Voigt-Element liefert eine exponentiell zeitabhängige Verlängerung, da die Dehnung des Elements durch den Dämpfer behindert wird. Wird die einwirkende Spannung zum Zeitpunkt  $t = t'$  wieder auf null gesenkt, dann reagiert die elastische Feder wieder sofort und verkürzt sich auf ihre Ausgangslänge. Der viskose Dämpfer hingegen verbleibt in seiner gestreckten Lage. Die Feder des Voigt-Elements bewirkt eine zeitabhängige Rückverformung. Mit der Zeit stellt sich eine Totaldehnung von  $\varepsilon_{ges} = \varepsilon_{v(t')}$  ein.

Tabelle 2.6: Beschreibung des Verformungsverhaltens mithilfe des 4-Elemente-Modells gemäß [67]

	Art der Verformung	Schaltbild	Dehnungsantwort auf Spannungssprung 	Mathematische Beschreibung
Maxwell-Element	<b>elastisch</b> spontan reversibel			<u>Verformung:</u> $\sigma_{(t)} = \sigma_0 = \text{const.}; t < t'$ $\epsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_0}$
				<u>Entlastung:</u> $\sigma_{(t)} = 0 = \text{const.}; t > t'$ $\epsilon_0 = 0$
	+	+	+	
	<b>viskos</b> zeitabhängig irreversibel			<u>Verformung:</u> $\sigma_{(t)} = \sigma_0 = \text{const.}; t < t'$ $\epsilon_{v(t)} = \frac{t \cdot \sigma_0}{\eta_0}$
				<u>Entlastung:</u> $\sigma_{(t)} = 0 = \text{const.}; t > t'$ $\epsilon_{v(t>t')} = \frac{t' \cdot \sigma_0}{\eta_0}$
	+	+	+	
Voigt-Element	<b>relaxierend</b> zeitabhängig reversibel			<u>Verformung:</u> $\sigma_{(t)} = \sigma_0 = \text{const.}; t < t'$ $\epsilon_{rel(t)} = \frac{\sigma_0}{E_{rel}} \cdot (1 - e^{-t/\tau})$
				<u>Entlastung:</u> $\sigma_{(t)} = 0 = \text{const.}; t > t'$ $\epsilon_{rel(t>t')} = \epsilon_{rel(t')} \cdot e^{-(t-t')/\tau}$
				<u>Relaxationszeit (<math>\tau</math>):</u> $\tau = \frac{\eta_{rel}}{E_{rel}}$
	=	=	=	
4-Elemente-Modell	<b>visko-elastisch</b> zeitabhängig teilweise reversibel			<u>Verformung:</u> $\sigma_{(t)} = \sigma_0 = \text{const.}; t < t'$ $\epsilon_{ges(t)} = \epsilon_0 + \epsilon_{v(t)} + \epsilon_{rel(t)}$
				<u>Entlastung:</u> $\sigma_{(t)} = 0 = \text{const.}; t > t'$ $\epsilon_{entl} = \epsilon_{v(t>t')} =$ $\epsilon_{ges(t')} - \epsilon_0 - \epsilon_{rel(t')} \cdot e^{-(t-t')/\tau}$

Aufgrund der Abhängigkeit des Verhaltens von thermoplastischen Werkstoffen von der Belastungsdauer muss bei der Durchführung und Auswertung von Versuchen an Kunststoffteilen zwingend beachtet werden, dass nur Versuchsergebnisse mit gleicher Belastungsdauer direkt miteinander vergleichbar sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse von Kurzzeitversuchen mit monoton steigendem Lastverlauf betrachtet. Aufgrund der kurzen Belastungsdauer sind die viskosen Verformungsanteile in derartigen Versuchen von untergeordneter Bedeutung. Bei der Simulation von Langzeitbelastungen (Kriech- oder Relaxationsvorgänge) müssen diese Anteile jedoch zwingend berücksichtigt werden.

### **Belastungsgeschwindigkeit**

Das Abgleiten der Molekülketten ist ein zeitabhängiger Vorgang. Je höher die Belastungsgeschwindigkeit bzw. die Dehnrate, mit der ein Thermoplast verformt wird, desto weniger Zeit haben die Molekülketten, um aneinander abzugleiten. Dies hat zur Folge, dass mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit die viskosen Effekte geringer werden und sich das Material nahezu elastisch verhält. Die Ketten haben keine Zeit zum Abgleiten und werden zerrissen, was eine Versprödung des Materials zur Folge hat [2]. Thermoplaste versagen unter Stoßbelastung spröde und verformungslos [48]. Sie erreichen bei großen Dehngeschwindigkeiten höhere Streckspannungen als bei langsamer Beanspruchung [68].

Der quantitative Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die mechanischen Eigenschaften von Thermoplasten ist auch für den Einsatz von Sinterprototypen im Entwicklungsprozess von großer Bedeutung. Versuchsergebnisse und Simulation können nur zusammenpassen, wenn beiden die gleiche oder zumindest eine ähnliche Belastungsgeschwindigkeit zugrunde liegt. Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem Polyamid wird in Abschnitt 5.4 diskutiert.

Die Berücksichtigung aller zuvor genannten Abhängigkeiten des Verformungsverhaltens von thermoplastischen Werkstoffen in Struktursimulationen stellt sehr hohe Anforderungen an das verwendete Materialmodell. Aus diesem Grund ist es wichtig, von Berechnungsaufgabe zu Berechnungsaufgabe zu entscheiden, welche Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen, um korrekte Ergebnisse zu bekommen. Mit der Komplexität des Materialmodells steigt der Prüfaufwand, der betrieben werden muss, um das Modell zu definieren und zu kalibrieren. Tabelle 6.1 auf Seite 141 enthält einen Vorschlag von Stommel [2] zur Klassifizierung von Materialmodellen anhand der Belastungsdauer.

## **2.6 Charakterisierung der Eigenschaften von Lasersinter- und Spritzgießbauteilen**

Die Grundvoraussetzung für eine homogene Kristallisation ist, unabhängig vom Verarbeitungsprozess, das kontrollierte und vollständige Aufschmelzen des Polymers. Bei teilkristallinen Werkstoffen, wie dem in dieser Arbeit betrachteten PA 12, müssen alle Kristallite aufschmelzen, sodass keine Kristallisationskeime im Material verbleiben. Diese Voraussetzung der vollständigen Homogenisierung der Schmelze ist beim Lasersintern in der Regel nicht erfüllt, da durch den Laser nicht genügend Energie eingebracht wird, um alle Kristallite komplett aufzuschmelzen. Somit ist zu erwarten, dass Kristallisationskeime in der Schmelze verbleiben, die den Kristallisationsvorgang beeinflussen. Das Vorhandensein von Kristallisationskeimen und die komplexen thermischen Bedingungen führen dazu, dass der Kristallisationsverlauf beim Lasersintern inhomogen und nicht exakt zu beschreiben ist [13]. Eine inhomogene Kristallstruktur führt in der Regel zu schlechteren mechanischen Eigenschaften [69]. Im Gegensatz dazu werden die Werkstoffe im Spritzgießprozess vollständig aufgeschmolzen. Zusätzlich erfolgt in der Plastifiziereinheit eine gründliche Durchmischung der Polymerschmelze, sodass die Molekülketten auch über die ehemaligen Grenzen der Granulatkörner hinweg miteinander verknäuel werden. Ein weiteres typisches Merkmal von lasergesinterten Kunststoffteilen ist das Vorhandensein von nicht oder nur teilweise aufgeschmolzenen Partikeln und Poren (Bild a) und b) in Abbildung 2.7) [48]. Im Gegensatz dazu besitzen Spritzgießbauteile (Bild c) in Abbildung 2.7) in der Regel weder Poren noch nicht aufgeschmolzene Partikel, wenn sie korrekt gefertigt wurden [16] [70].

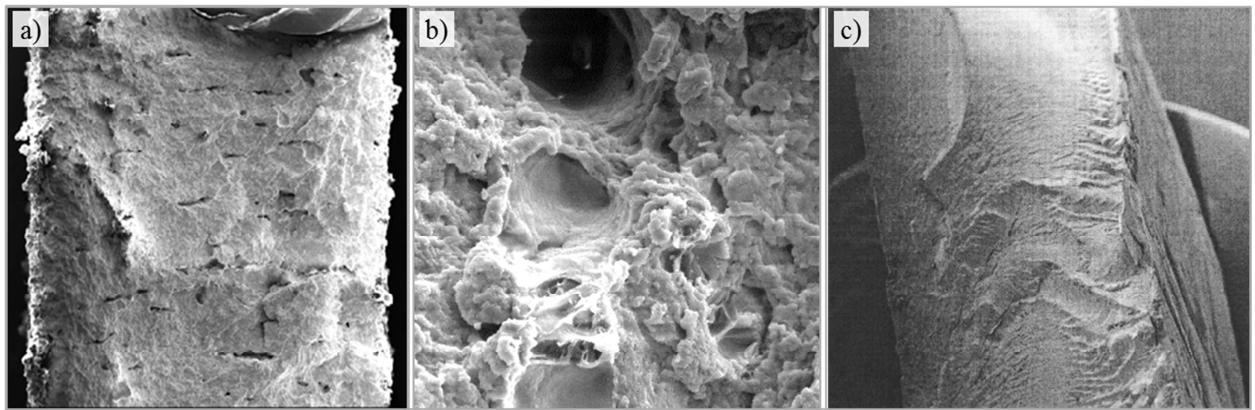


Abbildung 2.7: Bild a) Mehrere Poren auf der Bruchfläche eines lasergesinterten Probestabs [70];  
 Bild b) Detailaufnahme einer Pore auf der Bruchfläche eines lasergesinterten Probestabs [71];  
 Bild c) Bruchfläche eines spritzgegossenen Probestabs [70]

### 2.6.1 Nicht aufgeschmolzene Partikel in lasergesinterten Bauteilen

Nicht aufgeschmolzene Partikel können sowohl regellos als auch in schichtartiger Ansammlung im Inneren von Sinterteilen aus neuem bzw. aufgefrischtem Sinterpulver vorhanden sein. Die schichtweise Anordnung bei Neupulver wird von Moeskops [14] durch die Temperaturabnahme in Dickenrichtung einer Pulverschicht (siehe Unterabschnitt 3.5.3) erklärt. Dieser Effekt führt dazu, dass nur die obersten Partikel vollständig aufschmelzen und die darunterliegenden nicht. Bei aufgefrischtem Pulver hat Moeskops [14] eine vorrangig regellose Anordnung der nicht geschmolzenen Partikel festgestellt und erklärt diese durch den höheren Schmelzpunkt von thermisch gealtertem Sinterpulver (siehe Unterabschnitt 3.5.4), der dazu führt, dass lediglich das Neupulver vollständig aufschmilzt. Die beschriebenen Effekte sind in Abbildung 2.8 schematisch am Beispiel von acht Pulverkörnern einer Schicht eines Bauteilausschnitts dargestellt.

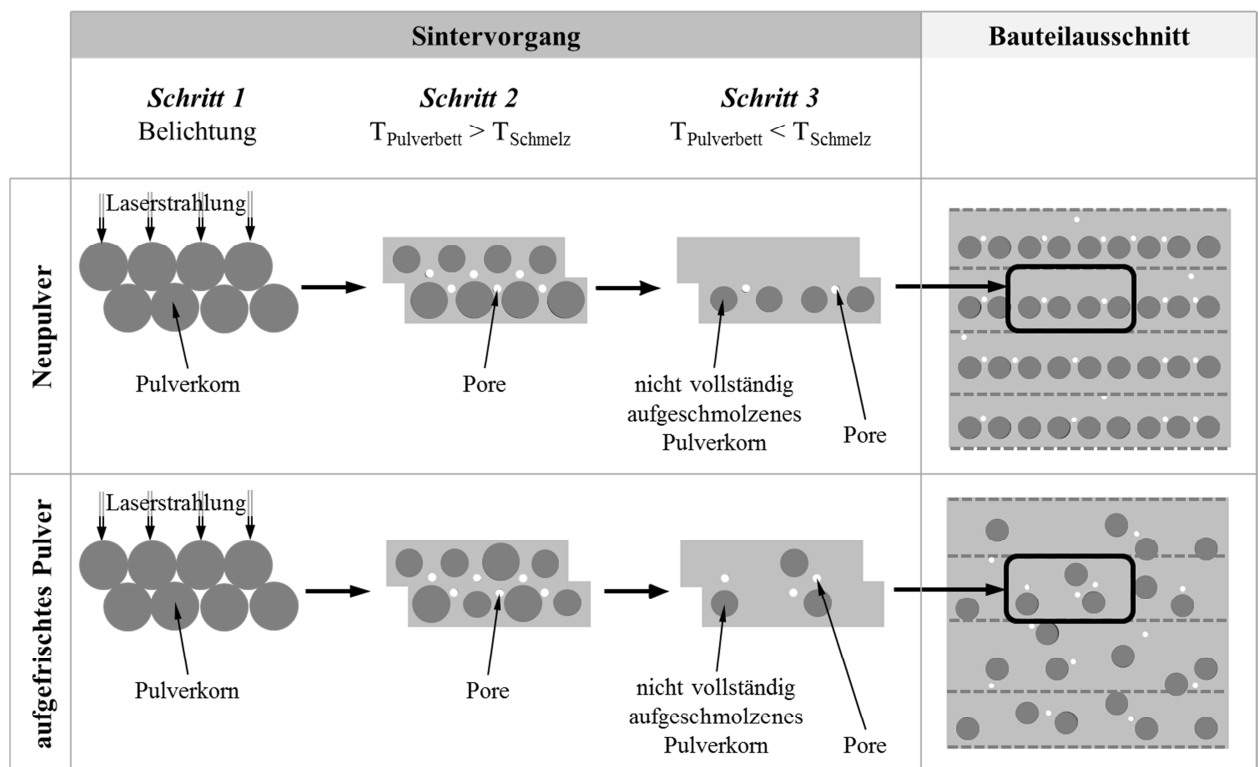


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der Entstehung und der Verteilung von nicht aufgeschmolzenen Pulverkörnern in neuem und aufgefrischtem Sinterpulver gemäß [14]



Die Pulverpartikel werden durch den Laser belichtet (Schritt 1) und beginnen aufgrund der absorbierten Energie aufzuschmelzen (Schritt 2). Durch das Aufschmelzen können Poren im Inneren der Schicht entstehen, wenn eingeschlossene Luft nicht vollständig entweicht. In Schritt 3 ist der Belichtungsvorgang abgeschlossen, und die Pulverbetttemperatur im betrachteten Bereich liegt wieder unterhalb der Schmelztemperatur. Ein weiterer Aspekt, der zu nicht aufgeschmolzenen Partikeln führen kann, ist die Varianz der Korngröße. Die verwendeten Pulver haben eine mittlere Körnung von 50 bis 60  $\mu\text{m}$  (siehe Unterabschnitt 3.6.1). Ist die zugeführte Energiemenge etwas zu gering, so schmelzen nur die kleinen Körner vollständig auf und die größeren nicht [22]. Nicht aufgeschmolzene Körner stellen Einschlüsse im Material dar, die die Verbindung zwischen zwei Schichten verschlechtern und die Rissbildung begünstigen [72]. Im Idealfall schmelzen alle Pulverkörner vollständig auf und fließen so zusammen, dass keine Poren entstehen (siehe Abbildung 2.9). Für ein vollständiges Zusammenfließen bei Umgebungsdruck sind die rheologischen Eigenschaften des Sintermaterials entscheidend (siehe Unterabschnitt 3.5.2).

### 2.6.2 Poren in lasergesinterten Bauteilen

Unvollständiges Aufschmelzen, eine hohe Schmelzviskosität und/oder eine hohe Oberflächenspannung verhindern das vollständige Zusammenfließen der Pulverpartikel und führen zur Ausbildung von Sinterhälsen (siehe Abbildung 2.9) sowie zur Entstehung von Poren (siehe Abbildung 2.8) [13]. Sie liegen tendenziell in der Ebene des Pulverauftrags und führen zu schlechteren mechanischen Eigenschaften in Bau- richtung (siehe Abschnitt 5.2). Poren sind eine Folge von zu geringer bzw. ungleichmäßiger Wärmezufuhr oder ungleichmäßiger Temperaturverteilung im Bauraum. Darüber hinaus können sie durch die Zersetzung von Pulverpartikeln infolge zu hoher Wärmezufuhr oder durch das Versinken der Schmelze im umliegenden Pulverbett entstehen. Die Porosität von Lasersinterbauteilen steigt mit abnehmender Energiedichte, da die Anzahl an unvollständig aufgeschmolzenen Pulverkörnern steigt. Eine erhöhte Porosität bewirkt eine größere Streuung der mechanischen Eigenschaften. Insbesondere die Bruchdehnung wird reduziert, da die Poren eine Fehlstelle im Inneren des Probestabs darstellen [16] [48] [70].



Abbildung 2.9: Vollständiges Zusammenfließen und Ausbildung von Sinterhälsen [13]

### 2.6.3 Mechanische Eigenschaften im Vergleich

Die mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten Kunststoffbauteilen wurden in bisherigen Untersuchungen sehr inkonsequent mit den Eigenschaften von spritzgegossenen Bauteilen verglichen [16]. Es fehlt ein systematischer Vergleich der Materialeigenschaften unter reproduzierbaren Prüfbedingungen. Mithilfe der aus wissenschaftlichen Untersuchungen und den Datenblättern der Sintermaterialien verfügbaren Materialkennwerte ist ein derartiger Vergleich nicht möglich, da die Prüfbedingungen in der Regel

nicht oder nur unvollständig dokumentiert sind (siehe Unterabschnitt 4.2.2). Dies führt dazu, dass der jeweilige Belastungszustand der untersuchten Probekörper nachträglich nicht mehr nachzuvollziehen ist.

Ajoku [70] hat in seinen Untersuchungen beispielsweise lediglich den Druck-E-Modul und die Druckfestigkeit von ungefülltem PA 12, das durch SLS und SG verarbeitet wurde, miteinander verglichen. Für die spritzgegossenen Proben hat er den größeren Druck-E-Modul und für die gesinterten Proben die höhere Druckfestigkeit gemessen. Als Grund für den geringeren Elastizitätsmodul nennt Ajoku [70] die Porosität der Sinterteile. Des Weiteren haben die Versuche gezeigt, dass spritzgegossenes PA 12 eine wesentlich größere Duktilität besitzt. Die Ergebnisse wurden in uniaxialen Druckversuchen gemäß DIN EN ISO 604 ermittelt [70] [73]. Die Auswertung von Druckversuchen, so wie sie in der Norm beschrieben wird, ist generell als kritisch zu bewerten, da sie auf der Berechnung von Nennspannungen beruht. Druckversagen ist nur bei der Auswertung von Nennspannungen ein Versagen aufgrund der uniaxialen Nennkraft. In Wirklichkeit handelt es sich um Schub- oder Quer-Zugversagen (siehe Abbildung 2.10). Dies wird allerdings nur bei der Betrachtung der örtlichen Spannungen in kurzen Druckproben deutlich [74]. Lange Druckproben können auch durch Knicken/Beulen versagen. Um das Ausknicken der Probestäbe bei höheren Belastungen zu vermeiden, hat Ajoku [70] die Druckfestigkeit an kurzen Proben des Typs B gemäß DIN EN ISO 604 [73] und den Modul an langen Probekörpern des Typs A bestimmt. Dieses Beispiel zeigt unmissverständlich, wie wichtig eine äußerst sorgfältige Planung, Vorbereitung und Durchführung von Werkstoffuntersuchungen ist, um zuverlässige und reproduzierbare sowie eindeutig auswertbare Ergebnisse zu erhalten. Auch die gewählte Prüfmethode und das eingesetzte Prüfequipment müssen immer im Hinblick auf die benötigten Ergebnisse ausgewählt werden.

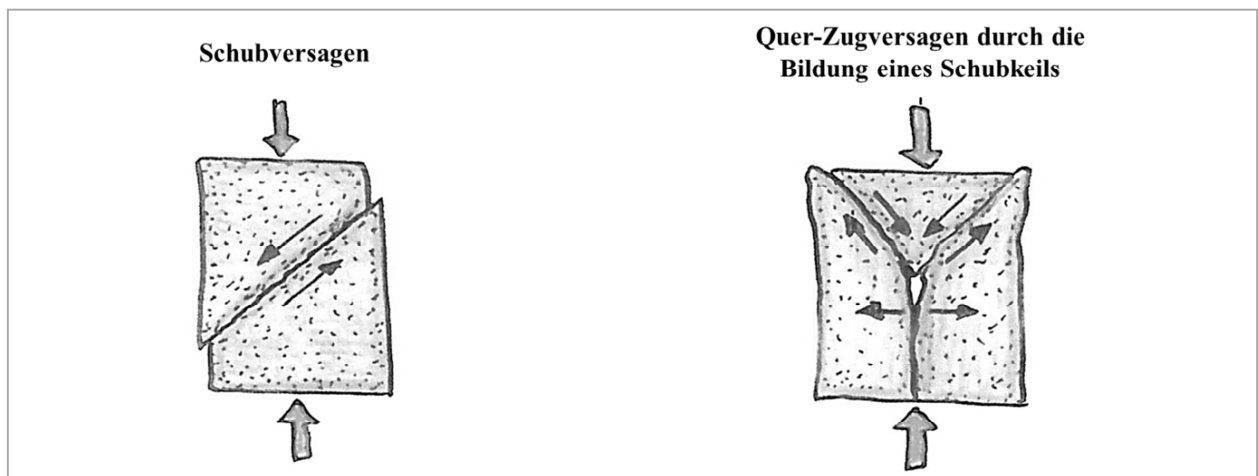


Abbildung 2.10: Schub- und Quer-Zugversagen bei uniaxialer Druckbelastung [75]

Moeskops [14] hat in Zugversuchen die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem Polyamid verglichen. Er hat für ungefüllte PA 12-Sinterproben eine höhere Zugfestigkeit ermittelt als für spritzgegossene Probestäbe. Auch in diesen Versuchen zeigte sich, dass die Bruchdehnung der Spritzgussproben wesentlich größer ist [14]. Ein Grund für die im Vergleich zu spritzgegossenem PA 12 höhere Zugfestigkeit ist der aufgrund der geringeren Abkühlgeschwindigkeit vorhandene höhere Kristallisationsgrad der lasergesinterten Probestäbe [16]. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Ajoku [70] und Moeskops [14] hat Blattmeier [76] in ihren Versuchen für spritzgegossene Probestäbe aus PA 12 die höhere Zugfestigkeit gemessen. Der gemessene E-Modul der lasergesinterten und der spritzgegossenen Probestäbe ist vergleichbar. Die höhere Duktilität der Spritzgussproben hat sich in den Versuchen von Blattmeier [76] erneut bestätigt. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Steifigkeit und Festigkeit von lasergesinterten und spritzgegossenen Kunststoffbauteilen aus ungefülltem PA 12 die glei-

che Größenordnung haben, wohingegen die Bruchdehnung in der Regel deutlich kleiner ist [16]. Als Hauptgrund für die im Vergleich zum Spritzgussmaterial geringe Duktilität des Sintermaterials nennt Bourell [16] die nicht vorhandene bzw. sehr schwach ausgeprägte Verknäuelung zwischen den Molekülketten der aufgeschmolzenen Pulverkörner. Im Gegensatz dazu werden die Grenzen zwischen den einzelnen Granulatkörnern im Spritzgussprozess vollständig aufgehoben, was eine bessere Verknäuelung der Molekülketten ermöglicht. Weitere Gründe sind das Vorhandensein von nicht aufgeschmolzenen Partikeln und Poren (siehe Unterabschnitt 2.6) sowie ein höherer Kristallisationsgrad und größere Sphärolithe infolge der geringen Abkühlgeschwindigkeit [16].

Für glaskugelgefülltes PA 12 liegen bisher keine wissenschaftlichen Vergleiche der mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten und spritzgegossenen Bauteilen vor. Deshalb werden in dieser Arbeit eigene Untersuchungen zur Analyse des quantitativen Zusammenhangs zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK durchgeführt (siehe Kapitel 5 und 7). Um bereits an dieser Stelle ein Verständnis für das Materialverhalten von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 zu bekommen, wird ihr Spannungs-Dehnungs-Verhalten nachfolgend charakterisiert.

#### 2.6.4 Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von ungefülltem PA 12, das im Spritzguss (Diagramm a) und durch Lasersintern (Diagramm b) verarbeitet wird, ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Die Kurven werden in uniaxialen Zugversuchen an spritz- bzw. sinterfrischen und luftfeuchten Probestäben ermittelt, die mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min zur Bestimmung des E-Moduls und 50 mm/min geprüft werden. Die Randbedingungen der durchgeführten Versuche sowie die Konditionierungszustände spritz- bzw. sinterfrisch und luftfeucht werden in Kapitel 4 ausführlich erläutert. In den Diagrammen ist jeweils die technische Zugspannung in MPa über der technischen Dehnung in % dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das jeweilige Fertigungsverfahren signifikanten Einfluss auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Probestäbe hat.

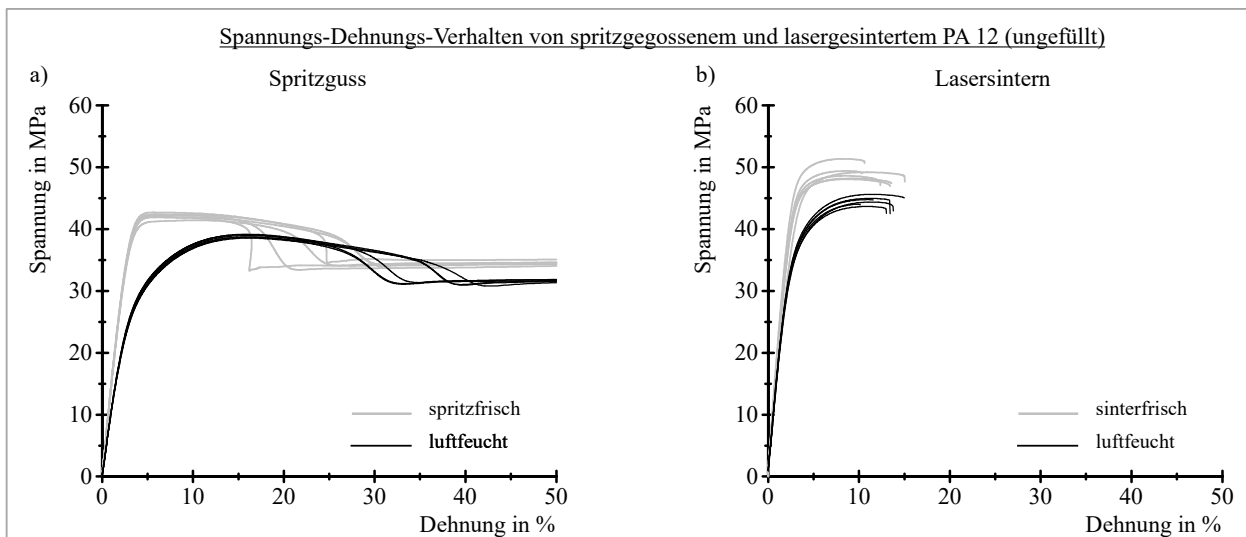


Abbildung 2.11: Spannungs-Dehnungs-Diagramme von spritzgegossenem und lasergesintertem PA 12 (ungefüllt)

Das spritzgegossene PA 12 zeigt sowohl im spritzfrischen als auch im luftfeuchten Zustand ein zähes Verhalten mit ausgeprägter Streckgrenze. Die Versuche werden bei 50 % Dehnung abgebrochen. Die Bruchdehnung liegt signifikant höher. Während des Zugversuchs kommt es zu einer deutlich erkennbaren

Einschnürung der Probestäbe, die sich im Laufe des Versuchs über die gesamte Länge des Prüfquerschnitts ausbreitet. Die technische Dehnung im Zugversuch wird mit einem berührenden Dehnungsaufnehmer (siehe Unterabschnitt 4.5.4) gemessen. Der Verlauf der technischen Spannungs-Dehnungs-Kurven ist nach dem Erreichen der Streckgrenze und der Einschnürung des Probekörpers wenig aussagekräftig, da die lokalen Spannungen und Dehnungen im Einschnürbereich stark von den technischen Werten abweichen (siehe Unterabschnitt 6.2.3). Im direkten Vergleich zu den spritzgegossenen Proben verhalten sich die lasergesinterten Probestäbe wesentlich spröder. Sie zeigen während des Versuchs keine deutlich erkennbare Einschnürung und besitzen keine ausgeprägte Streckgrenze. Die Kennwerte Streckspannung und Zugfestigkeit sind beim ungefüllten Sinterpolyamid gleich, da es nach dem Erreichen der Streckspannung zu keinem erneuten Spannungsanstieg kommt. Die Bruchdehnung der Probestäbe liegt deutlich unter 20 %. Erwartungsgemäß liegen die Kurven der luftfeuchten Probestäbe unter denen der spritz- bzw. sinterfrischen Proben.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf der systematischen Materialcharakterisierung und der wissenschaftlichen Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs zwischen den mechanischen Eigenschaften von glaskugelgefülltem PA 12, das durch SG und SLS verarbeitet wird. Für die notwendigen Untersuchungen werden zwei glaskugelgefüllte Spritzgusspolyamide und ein glaskugelgefülltes Sinterpolyamid ausgewählt. Die genauen Materialbezeichnungen sind in Tabelle 4.2 auf Seite 61 aufgeführt. Die Grundvoraussetzung für die nachfolgenden Untersuchungen sind Werkstoffe, die in einem stabilen und eindeutig definierten sowie sorgfältig überwachten Prozess von einem erfahrenen Materialhersteller gefertigt werden. Nur auf diese Weise können homogene und reproduzierbare Werkstoffeigenschaften sichergestellt werden, die für die Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs zwingend erforderlich sind. Aus diesem Grund werden für alle Untersuchungen Werkstoffe verwendet, die von erfahrenen Materialherstellern gefertigt werden. Da am Markt kein Spritzgusspolyamid von einem solchen Hersteller verfügbar ist, das wie das Sinterpolyamid einen Glaskugelanteil von 40 % aufweist, werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit zwei Spritzgusswerkstoffe charakterisiert; einer mit einem Glaskugelanteil von 30 % und einer mit einem Glaskugelanteil von 50 %.

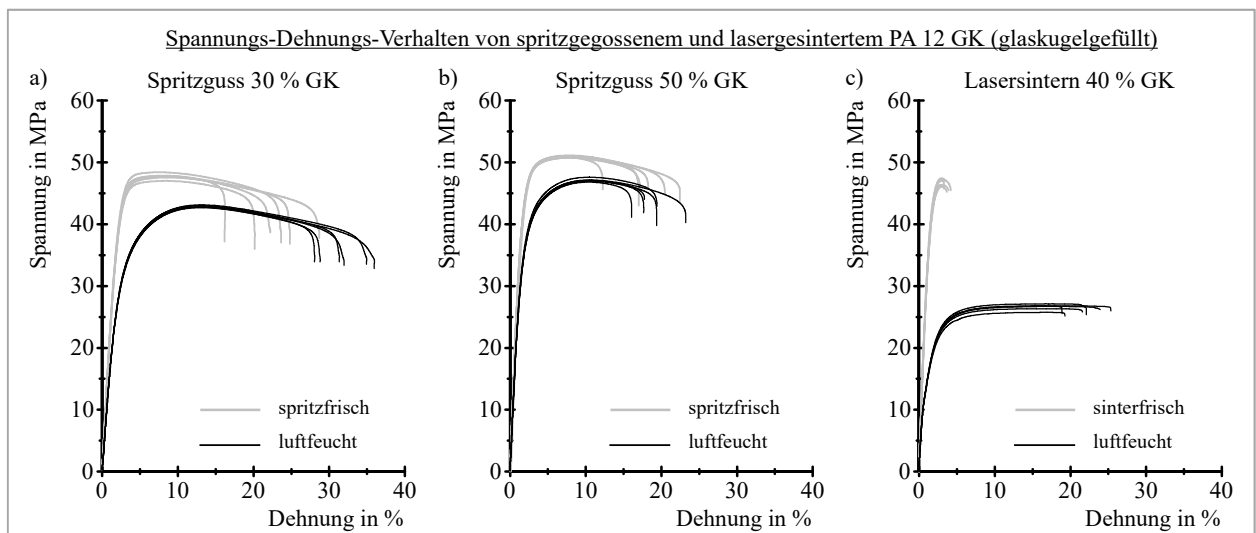


Abbildung 2.12: Spannungs-Dehnungs-Diagramme von spritzgegossenem und lasergesintertem PA 12 GK (glaskugelgefüllt)

In Abbildung 2.12 sind die Spannungs-Dehnungs-Diagramme der spritzgegossenen und lasergesinterten Probestäbe aus glaskugelgefülltem PA 12 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die unterschiedlichen Fertigungsverfahren signifikanten Einfluss auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Probestäbe

haben. Durch den Zusatz der Glaskugeln verändert sich das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Spritzgussmaterials dahin gehend, dass die bei ungefülltem PA 12 vorhandene ausgeprägte Streckgrenze verschwindet (vgl. Abbildung 2.11 und Abbildung 2.12). Die Kennwerte Streckspannung und Zugfestigkeit des glaskugelgefüllten Spritzgussmaterials sind gleich. Die Zähigkeit des gefüllten Spritzgussmaterials ist wesentlich geringer als die des ungefüllten Materials. Alle Spritzgussproben versagen im Versuch bei einer Bruchdehnung von weniger als 40 % (siehe Diagramm a) und b) in Abbildung 2.12). Im sinterfrischen Zustand zeigt sich, wie bereits beim Vergleich der ungefüllten Materialien, dass das Sintermaterial spröder als das Spritzgussmaterial ist. Wie schon bei den ungefüllten Sinterproben sind die Kennwerte Streckspannung und Zugfestigkeit des glaskugelgefüllten Sintermaterials gleich, da es im Versuch nach dem Erreichen der Streckspannung zu keinem erneuten Spannungsanstieg kommt. Die Bruchdehnung der frischen Sinterproben liegt unter 5 % (siehe Diagramm c) in Abbildung 2.12) und ist somit erheblich geringer als die der spritzgegossenen Stäbe. Der Grund hierfür ist wie bereits erwähnt die nicht vorhandene Verknäuelung zwischen den Molekülketten der aufgeschmolzenen Pulverkörner (siehe Unterabschnitt 2.6.3) [16]. Der Einfluss der Glaskugeln auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 wird in Abschnitt 5.1 ausführlich diskutiert. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der luftfeuchten Spritzgussproben liegen erwartungsgemäß unter denen der spritzfrischen Proben (siehe Abbildung 2.12). Der feuchtigkeitsbedingte Steifigkeits- und Festigkeitsabfall liegt beim gefüllten Spritzgussmaterial in der gleichen Größenordnung wie beim ungefüllten. Beim ungefüllten PA 12 ist die Beeinflussung durch die Wasseraufnahme bei den lasergesinterten und den spritzgegossenen Proben vergleichbar ausgeprägt. Aus diesem Grund ist zu erwarten, dass auch das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der glaskugelgefüllten Sinterproben ähnlich stark durch die Wasseraufnahme beeinflusst wird wie das Verhalten des glaskugelgefüllten Spritzgussmaterials. Entgegen der Erwartung wird das Materialverhalten der glaskugelgefüllten Sinterproben jedoch wesentlich stärker durch die Feuchtigkeitsaufnahme beeinflusst als das Spritzgussmaterial. Der Einfluss der Wasseraufnahme und die Gründe für die starke Beeinflussung der glaskugelgefüllten Sinterproben werden in Abschnitt 5.3 eingehend analysiert.

Das unterschiedliche Spannungs-Dehnungs-Verhalten zeigt, wie wichtig eine grundlegende Werkstoffcharakterisierung ist, bevor der quantitative Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 detailliert bewerten werden kann, da die mechanischen Eigenschaften unterschiedlich stark durch das jeweilige Fertigungsverfahren beeinflusst werden. Trotz der signifikanten Unterschiede im Materialverhalten kann durch den Einsatz von lasergesinterten Prototypen im Entwicklungsprozess eines Spritzgießbauteils ein signifikanter Mehrwert erzielt werden, wenn die spezifischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK berücksichtigt werden. Deshalb wird in Kapitel 5 der Einfluss folgender Faktoren sowohl für lasergesintertes als auch spritzgegossenes PA 12 GK quantifiziert:

- Einflusses der Glaskugeln (siehe Abschnitt 5.1 auf Seite 72)
- Einfluss der Ausrichtung im Herstellungsprozess (siehe Abschnitt 5.2 auf Seite 82)
- Einfluss der Wasseraufnahme (siehe Abschnitt 5.3 auf Seite 105)
- Einfluss der Prüfgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 5.4 auf Seite 121)
- Einfluss der Dicke des Probestabs (siehe Abschnitt 5.5 auf Seite 126)
- Einfluss der Charge/des Sinterexperten (siehe Abschnitt 5.6 auf Seite 133)

Zur Beurteilung der Versuchsergebnisse der lasergesinterten Probestäbe ist ein tief gehendes Verständnis des Einflusses verschiedener Parameter auf die mechanischen Eigenschaften notwendig. Aus diesem Grund wird in Kapitel 3 zunächst auf die Parameter des Sinterprozesses eingegangen.

### 3 Charakterisierung der Einflussgrößen des Lasersinterprozesses

Der Lasersinterprozess und damit die Eigenschaften von lasergesinterten Bauteilen unterliegen einer Vielzahl von Beeinflussungen. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Faktoren und deren Einfluss auf den Sinterprozess genauer betrachtet. Dieser Schritt ist notwendig, da die Interpretation von Versuchsergebnissen, die mithilfe von lasergesinterten Bauteilen ermittelt werden, ein umfassendes Verständnis der Zusammenhänge des Sinterprozesses erfordert. Die Schwerpunkte dieser Arbeit liegen jedoch wie einleitend dargestellt nicht auf der Sintertechnik an sich, sondern auf der grundlegenden Charakterisierung sowie dem systematischen Vergleich der mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK, der Abbildung des Kurzzeitverhaltens von lasergesinterten Bauteilen in der Struktursimulation sowie der wissenschaftlichen Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK auf Bauteilebene. Zur besseren Übersicht werden an dieser Stelle alle Einflussgrößen in sieben Hauptgruppen zusammengefasst (siehe Abbildung 3.1). Jeder der Oberbegriffe beinhaltet mehrere Parameter.

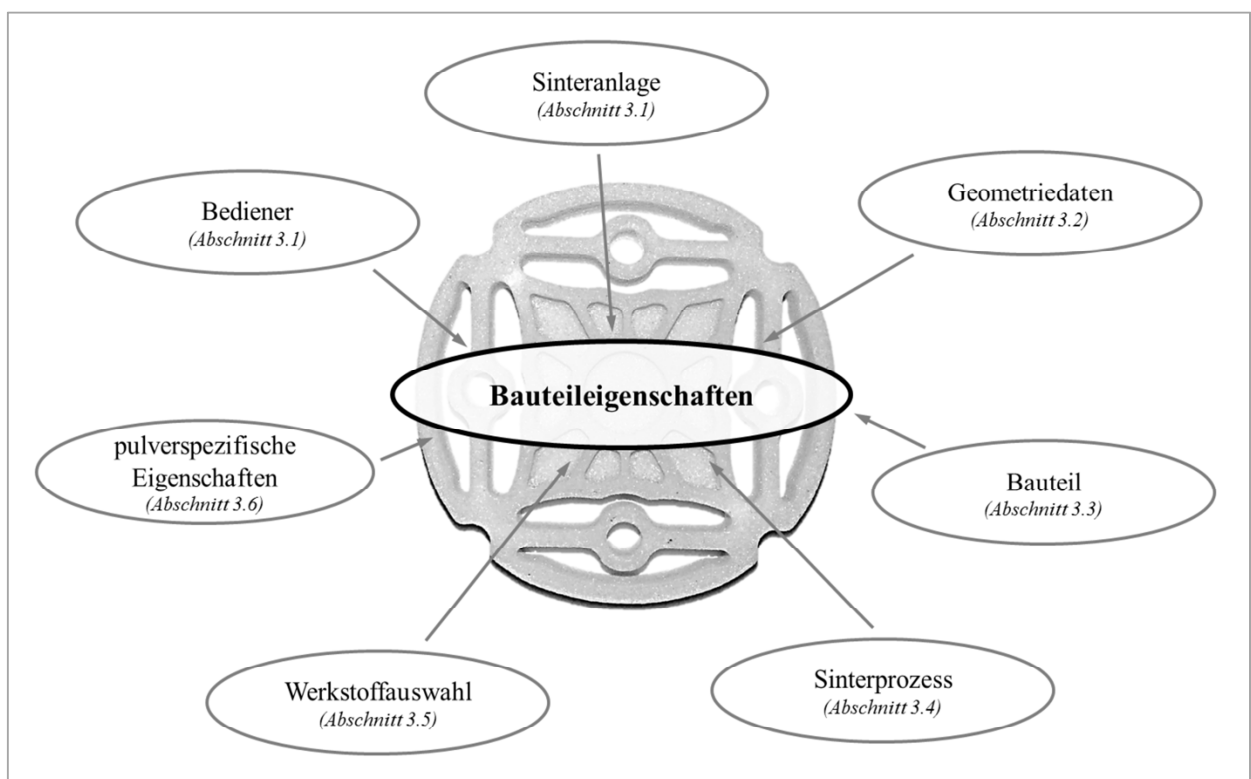


Abbildung 3.1: Unterteilung der wichtigsten Einflussgrößen des Lasersinterprozesses in sieben Hauptgruppen in Anlehnung an [13] [43] [47]

Die Abbildung zeigt, dass die Eigenschaften eines Sinterbauteils maßgeblich durch den Rohstoff (Werkstoffauswahl, pulverspezifische Eigenschaften) sowie den Verarbeitungsprozess (Bediener, Sinteranlage, Geometriedaten, Bauteil, Sinterprozess) beeinflusst werden, wobei Rohstoff und Verarbeitungsprozess zusätzlich in einer gegenseitigen Wechselwirkung stehen können. Diese Wechselwirkung zeigt sich exemplarisch am Beispiel der Nullviskosität der Kunststoffschmelze. Die Nullviskosität der Schmelze beeinflusst den Sinterprozess (siehe Unterabschnitt 3.5.2) und kann nicht nur durch die Wahl des Rohstoffs, sondern auch durch die Festlegung der Randbedingungen des Verarbeitungsprozesses zugunsten einer optimierten Prozessführung beeinflusst werden [29]. Die einzelnen Parameter der verschiedenen Hauptgruppen aus Abbildung 3.1 werden in den nachfolgenden Abschnitten detailliert betrachtet.

### 3.1 Bediener und Sinteranlage

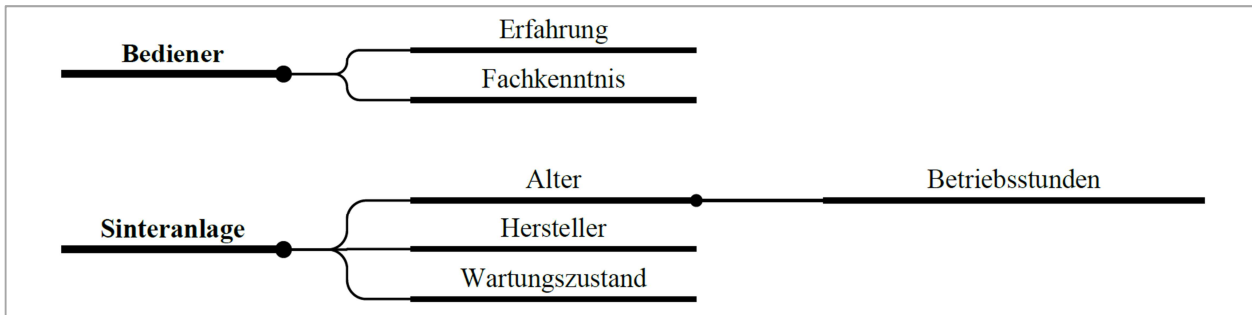


Abbildung 3.2: Einflussgrößen der Hauptgruppen Bediener und Sinteranlage

Abbildung 3.2 zeigt die beiden Hauptgruppen Bediener und Sinteranlage mit den dazugehörigen Einflussgrößen. In Bezug auf diese Größen ist es wichtig zu wissen, dass eine gut funktionierende und lückenlos gewartete Maschine für die Qualität der gesinterten Bauteile ebenso entscheidend ist wie ein erfahrener Bediener. Der wesentliche Einfluss des Bedieners liegt in der Vorbereitung des Sinterprozesses. Sie umfasst sowohl die Platzierung der Teile im Bauraum der Maschine (siehe Unterabschnitt 3.3.3) als auch die Wahl der Prozessparameter [22]. Darüber hinaus muss der Bediener das Sinterpulver für die Verarbeitung aufbereiten.

Um lasergesinterte Bauteile im Entwicklungsprozess von Spritzgießteilen zur Verifikation von Simulationsergebnissen und zur quantitativen Absicherung von Bauteilkonzepten einzusetzen, ist es wichtig, die Anzahl möglicher Störgrößen zu minimieren. Aus diesem Grund werden sowohl die Probestäbe, die zur Charakterisierung des Materialverhaltens in Kurzzeit-Zugversuchen eingesetzt werden (siehe Kapitel 5) als auch die lasergesinterten Funktionsprototypen und technischen Prototypen des späteren Spritzgießteils, die zur Durchführung von Bauteilversuchen benötigt werden (siehe Kapitel 6 und 7), vom gleichen Sinterexperten und auf derselben Maschine gefertigt (siehe Abschnitt 4.1). Die trotzdem vorhandene Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Fertigungscharge wird in Abschnitt 5.6 diskutiert.

### 3.2 Geometriedaten

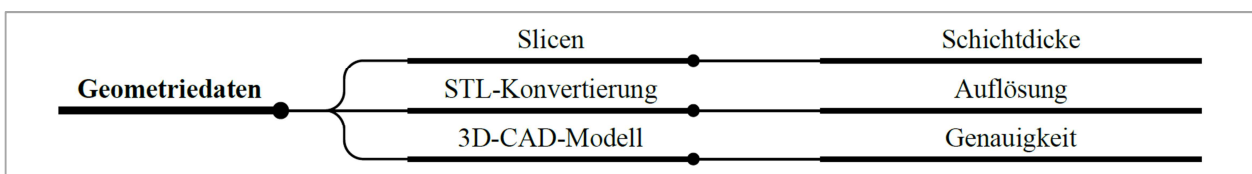


Abbildung 3.3: Hauptgruppe Geometriedaten

Die Einflussgrößen der Hauptgruppe Geometriedaten sind in Abbildung 3.3 dargestellt. Beim Lasersintern werden dreidimensionale Bauteile in einem direkten Prozess aus 3D-CAD-Modellen, die in das STL-Format konvertiert und durch eine spezielle Software in Schichten zerlegt werden, hergestellt [4] [47]. Die Abkürzung STL steht für Surface Tesselation Language. Bei der Konvertierung ins STL-Format wird die Oberfläche des Bauteils durch eine Vielzahl von Dreiecken angenähert. Dieser Vorgang wird Triangulation genannt. Das STL-Format ist der derzeitige Standard für alle generativen Fertigungsanlagen [22] [47]. Wird das STL-Format zum Datenaustausch zwischen Konstruktion und Fertigung benutzt, so muss bei der Erzeugung der Daten unbedingt darauf geachtet werden, dass die Auflösung dem jeweiligen Bauteil entsprechend definiert wird. Durch eine zu geringe Auflösung wird die geometrische Genauigkeit des

Sinterteils erheblich beeinflusst. Insbesondere die Abbildung von gekrümmten Flächen (z. B. Ausrundungsradien) erfordert eine hohe Auflösung (siehe Abbildung 3.4).

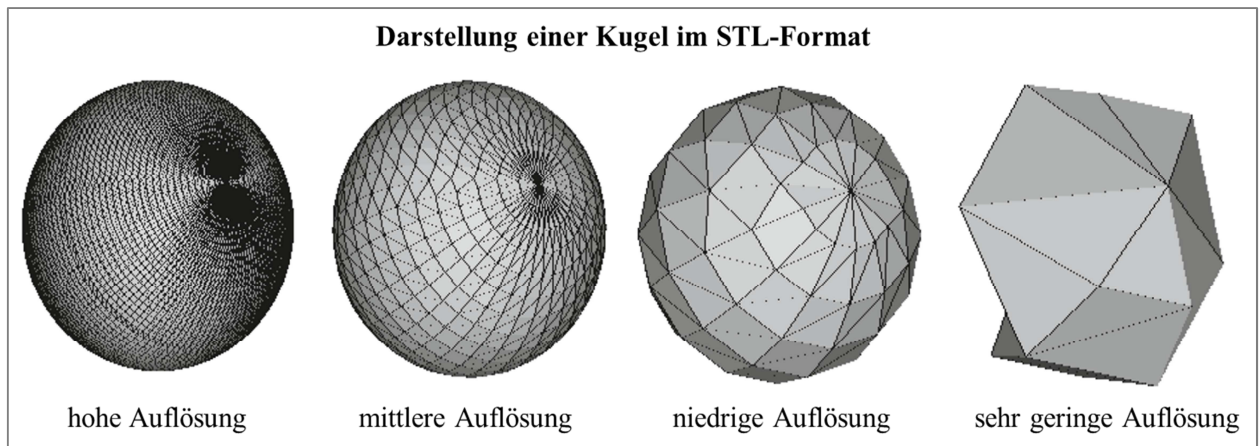


Abbildung 3.4: Darstellung einer Kugel im STL-Format in Abhängigkeit von der Auflösung bei der Erzeugung der Datei [13]

Der Vorgang des Auftrennens in übereinanderliegende Schichten wird Slicen genannt. Dieser Schritt beeinflusst ebenfalls die Geometrie des Sinterteils, da geneigte oder gekrümmte Flächen des Modells bei der Zerlegung in einzelne Schichten durch eine Treppenstruktur abgebildet werden, was zu geometrischen Ungenauigkeiten führt (Bild a) in Abbildung 3.5). Die Ausprägung des Treppenstufeneffekts ist abhängig von der Neigung bzw. Krümmung der Fläche und von der Schichtdicke. Beim Slicen gilt: je dünner die Schicht, desto höher die Abbildungsgenauigkeit und damit die geometrische Genauigkeit des gesinterten Bauteils [6] [22].

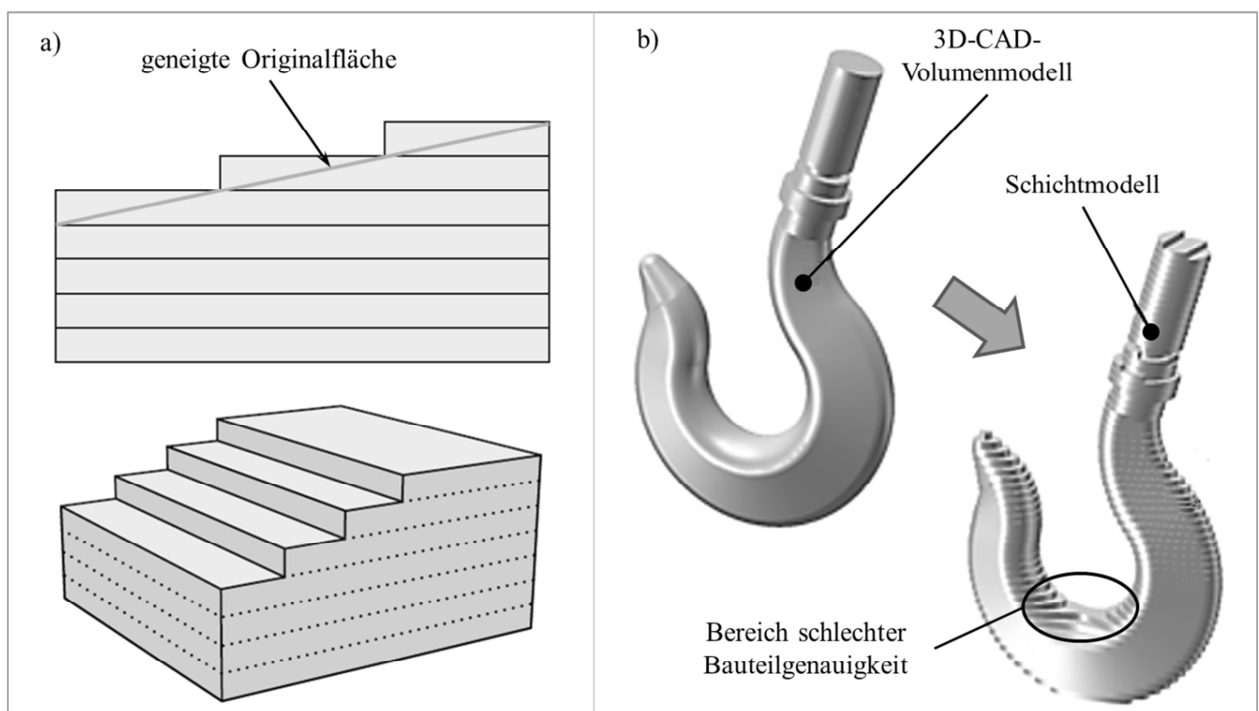


Abbildung 3.5: Bild a) Treppenstufeneffekt beim Slicen von schrägen Flächen [22];  
Bild b) Treppenstufeneffekt infolge des Slicens am Beispiel eines Kranhakens [77]

Bild b) der Abbildung 3.5 zeigt den entstehenden Treppenstufeneffekt am Beispiel eines Kranhakens. Auf der linken Seite ist das 3D-CAD-Volumenmodell dargestellt und rechts das zusammengesetzte Schichtmodell. Im unteren Bereich des Hakens wird die Originalkontur nur unzureichend wiedergegeben, da die Schichtdicke zu groß gewählt wurde. Der Einfluss der Schichtdicke auf den Sinterprozess wird in Unter-



abschnitt 3.4.2 erläutert. Um den Treppenstufeneffekt auf Funktionsflächen zu vermeiden, sollten diese nach Möglichkeit im Bauprozess parallel oder senkrecht zur Bauplattform angeordnet werden [77].

Die geometrische Genauigkeit des Bauteils hängt bei generativen Fertigungsverfahren in entscheidendem Maße von der Qualität der verwendeten Geometriedaten ab. Das spätere Bauteil kann nie genauer sein als das zugrunde liegende Modell [13] [47]. Eine unzureichende Auflösung bei der STL-Konvertierung und/oder beim Slicen beeinflusst nicht nur die geometrische Genauigkeit, sondern auch die mechanischen Eigenschaften des Bauteils und die bei gleicher Last auftretende Werkstoffbeanspruchung. Bei zu geringer Auflösung entstehen Kanten bzw. Kerben, die unter Belastung lokale Spannungsspitzen erzeugen, die bei der Originalgeometrie nicht vorhanden sind (siehe Abbildung 3.6).

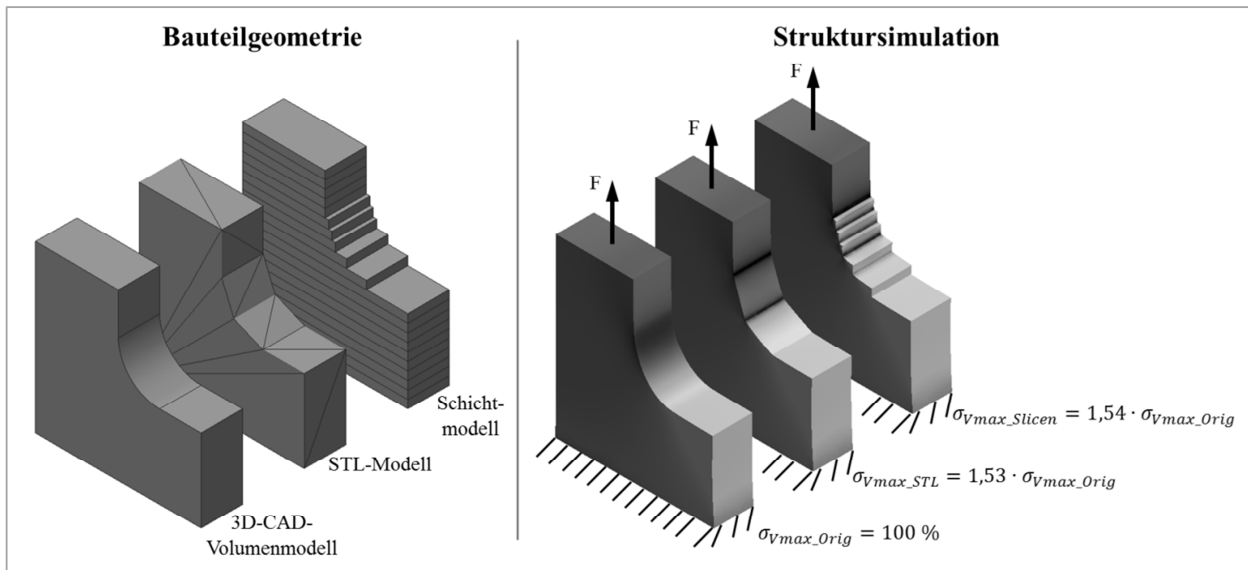


Abbildung 3.6: Spannungsspitzen an einem einfachen Bauteil infolge zu geringer Auflösung bei der Datenkonvertierung

Abbildung 3.6 verdeutlicht auch, dass Fehler bei der Datenkonvertierung dazu führen können, dass ein Abgleich zwischen Bauteilversuch mit lasergesintertem Prototyp und Struktursimulation nur noch bedingt möglich ist. Auch der quantitative Zusammenhang zwischen der Belastbarkeit eines lasergesinterten Prototyps und des spritzgegossenen Serienbauteils kann auf diese Weise beeinflusst werden. Deshalb muss die Aufbereitung der 3D-CAD-Daten immer mit der erforderlichen Sorgfalt erfolgen. In diesem Vorhaben wird die erforderliche Datenqualität durch die Zusammenarbeit mit sehr erfahrenen Sinterexperten sichergestellt (siehe Unterabschnitt 4.1).

### 3.3 Bauteil



Abbildung 3.7: Parameter der Hauptgruppe Bauteil

In Abbildung 3.7 sind die Einflussgrößen der Hauptgruppe Bauteil zusammengefasst dargestellt. Die Erläuterung der einzelnen Größen erfolgt in den nachfolgenden Unterabschnitten.

### 3.3.1 Orientierung

Die Raumkoordinaten einer Sinteranlage sind gemäß Abbildung 3.8 definiert. Die X- und Y-Achse entsprechen den Kanten der Arbeits- bzw. Bauplattform, wobei die X-Richtung der Verfahrrichtung des Beschichters bzw. Wischers, der für den Auftrag einer neuen Pulverschicht zuständig ist, entspricht. Die Z-Richtung ist die Verfahrrichtung der Plattform (Komponenten der Maschine siehe Abbildung 2.3).

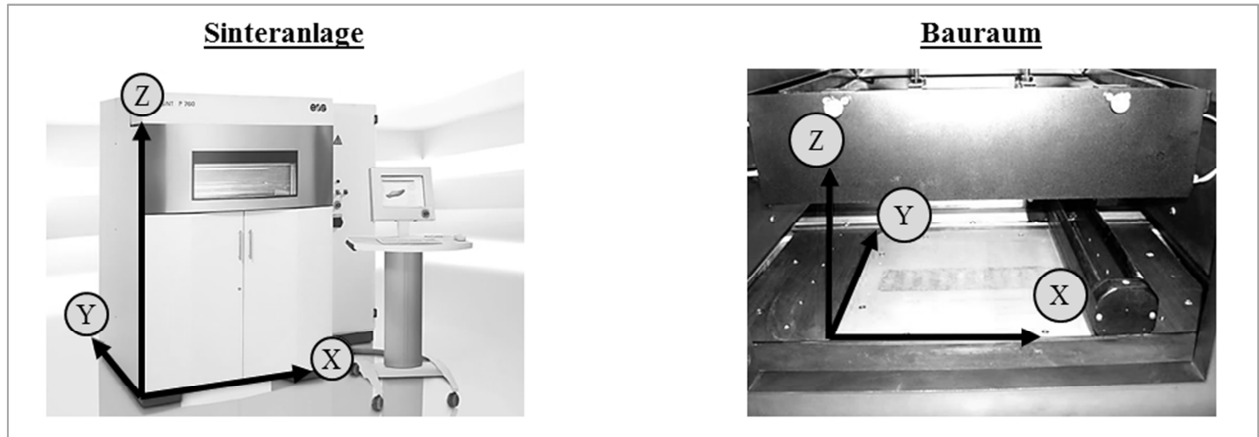


Abbildung 3.8: Raumkoordinaten einer Sinteranlage gemäß [78]

Die Orientierung des Bauteils im Bauraum der Sinteranlage ist einer der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Bauteilqualität. Bei der Festlegung der Bauteilausrichtung müssen verschiedene orientierungsabhängige Effekte berücksichtigt werden. Eine optimierte Ausrichtung kann den Treppenstufeneffekt (siehe Abschnitt 3.2) minimieren und die Oberflächenqualität sowie die Bauteilgenauigkeit verbessern. Darüber hinaus ergeben sich durch den schichtweisen Bauprozess anisotrope Materialeigenschaften (siehe Unterabschnitt 5.2.1) wie Festigkeit, Steifigkeit und Schrumpfung des Materials [77]. Wird die Orientierung der Bauteile im Sinterprozess konstant gehalten, so lässt sich eine hohe Reproduzierbarkeit des Bauteilverhaltens feststellen [48].

Der Einfluss der Bauteilorientierung in Relation zu den Raumkoordinaten der Lasersinteranlage ist ein wichtiger Parameter. Sowohl für die Simulation des Kraft-Verformungs-Verhaltens von lasergesinterten Bauteilen in Kapitel 6 als auch für die Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs in Kapitel 7 ist die Kenntnis der Anisotropie der mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten Bauteilen zwingend erforderlich. Aus diesem Grund werden in Abschnitt 5.2 die richtungsabhängigen Eigenschaften von lasergesinterten Bauteilen aus PA 12 GK mithilfe von Zugversuchen an unterschiedlich ausgerichteten Probestäben analysiert und direkt mit den anisotropen Eigenschaften von spritzgegossenen Probestäben aus PA 12 GK verglichen. Darauf aufbauend erfolgt in Unterabschnitt 5.2.7 der direkte Vergleich der Anisotropie von glaskugelgefüllten Sinter- und Spritzgusspolyamiden. Die Bezeichnung und die Orientierung der verwendeten Probestäbe erfolgt unter Zuhilfenahme der Raumkoordinaten der Sinteranlage. Sie wird in Abschnitt 4.3 ausführlich erläutert.

### 3.3.2 Wandstärke

Die Geometrie, insbesondere die Wanddicke eines Lasersinterbauteils, hat Einfluss auf die Temperaturverteilung im Pulverbett sowie die Abkühlgeschwindigkeit und damit auf die Eigenschaften des späteren Bauteils. In der Nähe von hohen und sehr massiven Bereichen stellt sich im Sinterprozess eine höhere Temperatur im Pulverbett ein als in der Nähe von filigranen Tragwerken. Auch im Abkühlprozess kommt

es in Bereichen unterschiedlicher Wanddicke zu einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung. Diese Aspekte müssen bereits bei der Konstruktion der Bauteile und bei der Anordnung der Bauteile im Bauraum der Maschine berücksichtigt werden [22]. Im Rahmen dieser Arbeit werden Lasersinterenteile als Funktionsprototyp von Spritzgießbauteilen eingesetzt. Für die Konstruktion von Spritzgießteilen gilt ebenfalls, dass Masseanhäufungen zu vermeiden und gleichmäßige Wandstärken anzustreben sind [79]. Grundsätzlich gilt sowohl für die Konstruktion von Lasersinter- als auch von Spritzgießbauteilen:

- ➔ Materialanhäufungen vermeiden
- ➔ Gleichmäßige Wandstärken realisieren

Zur Vermeidung von Temperaturgradienten sind bei der Gestaltung von Lasersinterenteilen weiterhin große Sprünge in den Querschnittsflächen von aufeinanderfolgenden Schichten zu vermeiden [77].

- ➔ Kontinuierliche Querschnittsveränderung vorsehen

Des Weiteren darf die Geometrie eines Sinterenteils keine geschlossenen Hohlräume aufweisen. Bei der Konstruktion müssen Löcher vorgesehen werden, da das nicht aufgeschmolzene Pulver sonst nicht entfernt werden kann [22].

- ➔ Keine geschlossenen Hohlräume vorsehen

Bei der Gestaltung von Spritzgießteilen und Lasersinterbauteilen besteht großes Potenzial zur freien Formgebung. Dieses kann unter anderem zur Funktionsintegration genutzt werden. Aufgrund der werkzeuglosen Fertigung ist die Geometriefreiheit beim Lasersintern insgesamt sogar noch größer.

- ➔ Geometriefreiheit ausnutzen

Zur Analyse des Einflusses der Probekörperdicke auf die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK werden in Abschnitt 5.5 die Ergebnisse von Zugversuchen an unterschiedlich dicken Probekörpern diskutiert. Die Kenntnis des Einflusses der Wanddicke ermöglicht die Erstellung von Materialmodellen, die die geometrischen Verhältnisse des realen Bauteils widerspiegeln (siehe Unterabschnitt 6.6.1).

### 3.3.3 Position im Bauraum

Der Laserstrahl wird im Inneren der Sinteranlage von einem Spiegel umgelenkt. Dieser Spiegel ist ortsfest im Bauraum platziert. Nur unmittelbar unter dem Spiegel trifft der Laserstrahl senkrecht auf das Bauteil und hat eine runde Form. Je weiter der Laserstrahl ausgelenkt wird, desto ovaler wird er. Dadurch verteilt sich die Energie des Strahls auf eine größere Fläche. Unter Umständen kann dieser Effekt zu unterschiedlichen Bauteileigenschaften in Abhängigkeit von der Position im Bauraum führen. Darüber hinaus kann die Position im Bauraum die mechanischen Eigenschaften aufgrund der unterschiedlichen Abkühlraten beeinflussen. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einfluss der Position im Bauraum der Sinteranlage auf die Bauteileigenschaften in der Praxis von geringer Bedeutung ist [22].

### 3.3.4 Skalierungsfaktoren

Vor dem Sintervorgang muss die Geometrie des Bauteils mithilfe von definierten Faktoren skaliert werden. Auf diese Weise werden die Schrumpfung und die thermische Schwindung im Sinterprozess kompensiert, sodass maßhaltige Bauteile entstehen. Die Volumenreduktion durch Schrumpfung entsteht durch

die Porositätsabnahme beim Aufschmelzen des Sinterpulvers und ist auf den Unterschied zwischen der Schüttgutdichte des Pulvers und der Materialdichte des lasergesinterten Bauteils zurückzuführen. Die Höhe der Schrumpfung wird grundsätzlich durch die Ausbildung von Sinterhälsen und das Vorhandensein von Poren im Inneren des lasergesinterten Bauteils beeinflusst (siehe Abbildung 2.9). Hinsichtlich thermischer Schwindung werden zwei Arten unterschieden: zum einen die Erstarrungsschwindung und zum anderen die Abkühlsschwindung. Erstarrungsschwindung bezeichnet die Volumenreduktion durch Vorgänge bei Phasenübergängen und Abkühlsschwindung die Volumenreduktion durch Abkühlung. Der Schrumpf und die thermische Schwindung sind die Hauptursachen für die Entstehung von Bauteilverzug, der stets die Folge einer anisotropen Volumenänderung ist. Beide Vorgänge können durch die Temperaturführung in der Prozesskammer und die eingebrachte Energiemenge beeinflusst werden. Die Größe der Skalierungsfaktoren wird in erster Linie durch die Art des Werkstoffs bestimmt. Amorphe Thermoplaste schrumpfen und schwinden im Sinterprozess um 0,5 bis 1,5 %. Teilkristalline Thermoplaste hingegen unterliegen einer Volumenreduktion zwischen 3,0 und 5 % [43]. Auch bei der Entwicklung von Spritzgießbauteilen werden Skalierungsfaktoren zur Kompensation der Bauteilschwindung berücksichtigt. Diese sind allerdings unterschiedlich zu denen des Lasersinterprozesses, da es im Spritzgießwerkzeug keine Porositätsabnahme durch Aufschmelzen gibt. Im Spritzgießprozess wird das Werkzeug von vornherein mit vollständig aufgeschmolzenem und gut durchmischem Material gefüllt. Die Verarbeitungsschwindung von Spritzgießbauteilen beträgt bei ungefüllten amorphen Thermoplasten 0,4 bis 0,8 % und bei teilkristallinen Thermoplasten üblicherweise 1,0 bis 2,5 % [49] [80].

### 3.4 Sinterprozess

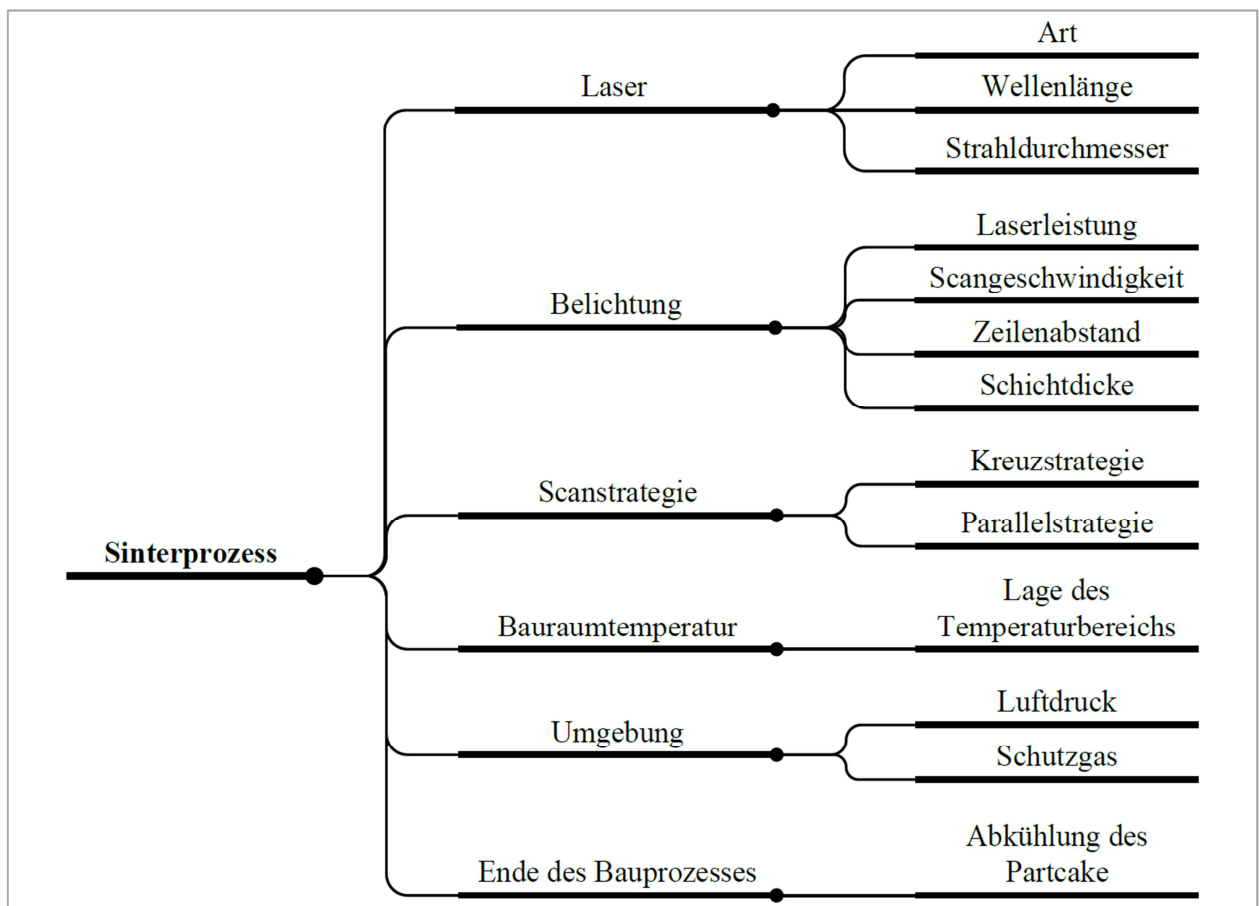


Abbildung 3.9: Parameter der Hauptgruppe Sinterprozess

Die Hauptgruppe Sinterprozess umfasst mehrere Einflussgrößen. Alle Parameter sind in Abbildung 3.9 dargestellt. Die Kenntnis der einzelnen Parameter ist für das Verständnis der vorliegenden Arbeit von Bedeutung. Aus diesem Grund werden die einzelnen Größen in den Unterabschnitten 3.4.1 bis 3.4.6 ausführlich erläutert.

### 3.4.1 Laser

In den meisten Sinteranlagen wird ein CO<sub>2</sub>-Laser verwendet. Die Wellenlänge ( $\lambda$ ) eines derartigen Lasers beträgt 10,6  $\mu\text{m}$ . Damit liegt sie weit oberhalb des sichtbaren Bereichs. Aufgrund seiner Wellenlänge kann der Strahl eines CO<sub>2</sub>-Lasers nicht in Glasfasern geführt werden, da diese das Laserlicht nahezu vollständig absorbieren würden. Deshalb wird der Strahl im Inneren einer Sinteranlage wie bereits erwähnt mithilfe eines Spiegelsystems geführt [7] [47]. Der Grund für die Verwendung von CO<sub>2</sub>-Lasern ist, dass organische Werkstoffe wie Polymere im fernen infraroten Bereich ein hohes Absorptions- und ein geringes Reflexionsvermögen aufweisen (siehe Unterabschnitt 3.5.3). Alternativ könnte ein Excimer-Laser, dessen Wellenlänge ( $\lambda = 193$  bis  $308$  nm) im fernen ultravioletten Bereich liegt, verwendet werden. Auch in diesem Bereich weisen Polymere ein hohes Absorptionsvermögen auf [16] [43] [81].

Der Strahldurchmesser des verwendeten Lasers beträgt üblicherweise ca. 0,4 mm und bestimmt die minimal herstellbare Wanddicke des Bauteils in der XY-Ebene [22]. Dünnere Strukturen können nicht originalgetreu abgebildet werden. Sie werden im Belichtungsprozess je nach Steuerungssoftware entweder ausgelassen oder mit der anlagenabhängigen Mindestwanddicke gesintert. In beiden Fällen entspricht die Geometrie des Sinterteils dann nicht der Geometrie des Modells. Derartige fertigungsbedingte Abweichungen zwischen Originalgeometrie und Sinterteil müssen bei der Beurteilung von Versuchsergebnissen und der Verifikation von Simulationsergebnissen durch Prototypversuche unbedingt berücksichtigt werden. Alle Lasersinterteile, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, werden auf Sinteranlagen hergestellt, die mit einem CO<sub>2</sub>-Laser arbeiten.

### 3.4.2 Belichtung und Belichtungsparameter

Die Generierung des Bauteils beim Lasersintern erfolgt schichtweise, wobei jede Schicht zeilenweise erstellt wird. Für ein besseres Verständnis des Belichtungsprozesses sind in Bild a) der Abbildung 3.10 die wichtigsten Kenngrößen dargestellt. Die Partikel in Scanrichtung (X-Richtung in Abbildung 3.10) verbinden sich sehr gut miteinander, da sie unmittelbar nacheinander aufgeschmolzen werden [27]. Es entsteht eine Verbindung mit dem Durchmesser  $D_x$  (Bild (1) in Abbildung 3.10). Der Abbildung liegt ein Sinterprozess zugrunde, bei dem die Belichtung parallel zur X-Achse, der Spurversatz in Y-Richtung und der Schichtzuwachs in Z-Richtung erfolgen.

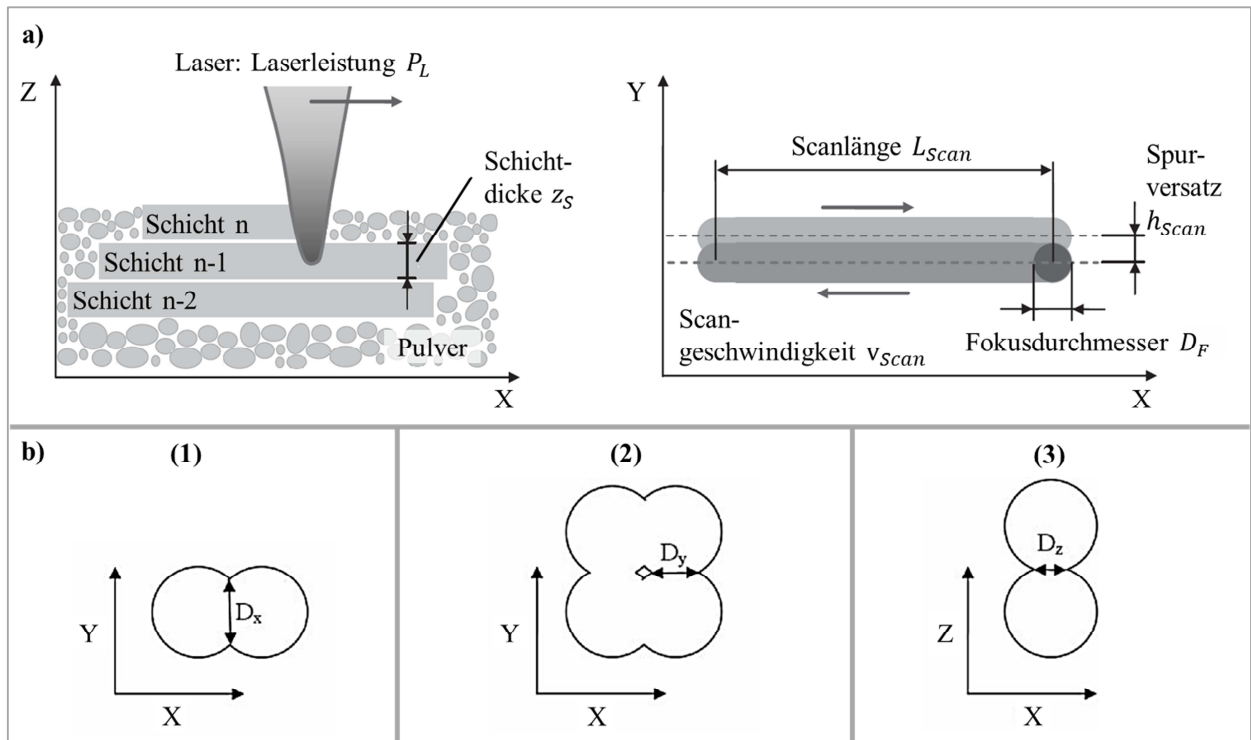


Abbildung 3.10: Bild a) Kenngrößen des Lasersinterns gemäß [48];  
Bild b) Verbindungsdurchmesser beim Lasersintern in X-, Y- und Z-Richtung gemäß [27]

Der Verbindungsdurchmesser wird direkt von der Scangeschwindigkeit ( $v_{scan}$ ) und der Laserleistung ( $P_L$ ) beeinflusst und nimmt mit steigender Geschwindigkeit ab [82]. Die notwendige Laserleistung ist unter anderem von der Vorwärmtemperatur des Pulverbetts abhängig (siehe Unterabschnitt 3.4.4). Je höher die Temperatur des Pulverbetts, desto geringer die für das Aufschmelzen benötigte Energiemenge und damit auch die notwendige Laserleistung [16]. Eine Vorwärmung des Pulvers ist bei Kunststoffen aufgrund der schlechten Wärmeleitung zwingend notwendig. Ohne Vorwärmung würde das Pulver nur in einer sehr dünnen Schicht aufschmelzen oder bei höherer Laserleistung sofort verdampfen [83]. Die für das Schmelzen erforderliche Laserleistung kann mit Gleichung (3.1) in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit und dem Strahldurchmesser überschlägig ermittelt werden [43].

$$P_L = \frac{\pi \cdot D_F^2 \cdot z_m \cdot \rho \cdot (c_p \cdot \Delta T + H_m)}{4 \cdot A \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot z_m})} \cdot \frac{v_{scan} \cdot r_F}{2} \quad [W] \quad (3.1)$$

mit:

- $D_F$  = Strahldurchmesser im Fokus
- $z_m$  = Schmelztiefe
- $\rho$  = Dichte
- $c_p$  = spezifische Wärmekapazität
- $\Delta T$  = zu überbrückende Temperaturdifferenz
- $H_m$  = spezifische Schmelzenthalpie
- $A$  = Absorptionsgrad
- $\alpha$  = Absorptionskoeffizient
- $v_{scan}$  = Scangeschwindigkeit

Die Energie, die der Laserstrahl bei der Belichtung einer Zeile bereitstellt, wird Streckenenergie ( $E_{st}$ ) genannt. Nachdem eine Zeile der Querschnittsfläche gescannt wurde, wird der Laser quer zur aktuellen

Sinterrichtung um den eingestellten Spurversatz ( $h_{\text{scan}}$ ) verschoben, um die nächste Zeile zu belichten. Der Spurversatz ist in der Regel kleiner als der Durchmesser des Laserstrahls. Dadurch wird die zuvor belichtete Zeile teilweise noch einmal belichtet. Diese Überlappung ist gewollt und beeinflusst die Güte der Verbindung von Einzelspuren zu einer kompletten Schicht des Bauteilquerschnitts. Durch einen kleineren Spurversatz steigen die pro Schicht eingebrachte Energiemenge sowie die benötigte Bauzeit an. Die Partikel der neuen Zeile verschmelzen trotz der Überlappung beim Belichten schlechter mit der zuvor gescannten Zeile als die Partikel in einer Zeile, da die vorherige Zeile bereits ein wenig abgekühlt ist. Es entsteht eine Verbindung mit dem Durchmesser  $D_y$  (Bild (2) in Abbildung 3.10) [27] [43] [47] [84]. Dieser Effekt kann verringert werden, wenn zusammenhängende Flächen eines Querschnittssegments immer einzeln gefüllt werden, obwohl in der gleichen Zeile noch weitere zu scannende Bereiche liegen. Deshalb ist diese Belichtungsstrategie gegenüber dem Aufschmelzen von unterbrochenen Zeilen, die über den gesamten Bauraum verlaufen, zu bevorzugen [22]. Nachdem eine Querschnittsfläche vollständig belichtet ist, wird die Bauplattform um eine Schichtdicke ( $z_s$ ) abgesenkt. Das nicht aufgeschmolzene Pulver verbleibt an Ort und Stelle und übernimmt eine Stützfunktion für nachfolgende Schichten [22]. Anschließend wird mit dem Wischer eine neue Pulverschicht aufgetragen, und die Belichtung der neuen Querschnittsfläche beginnt (siehe Abbildung 2.2). Zwischenzeitlich ist die zuvor gescannte Schicht jedoch weiter ausgekühlt, was dazu führt, dass die Verbindung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schichten noch schlechter ist als die Verbindung zwischen den Zeilen einer Schicht. Der Verbindungsdurchmesser  $D_z$  ist folglich kleiner als die Durchmesser  $D_x$  und  $D_y$  (Bild (3) in Abbildung 3.10) [27]. Dieser Effekt wird zusätzlich durch die Temperaturabnahme in Dickenrichtung einer Schicht verstärkt [14]. Innerhalb einer Schicht entsteht ein Temperaturgefälle, da nur die obersten Partikel einer Schicht unmittelbar mit dem Laserstrahl in Kontakt kommen und die einwirkende Laserleistung mit zunehmender Eindringtiefe ( $z_{\text{Ein}}$ ) (siehe Abbildung 3.19) gemäß dem Beer-Lambertschen Absorptionsgesetz (siehe Gleichung (3.3) in Unterabschnitt 3.5.3) abnimmt.

Der Einfluss der Parameter Laserleistung, Spurversatz, Scangeschwindigkeit, Schichtdicke und Energiedichte wird im Rahmen dieser Arbeit nicht im Einzelnen untersucht. Die Festlegung der Anlagenparameter erfolgt gemäß der Empfehlung des Materialherstellers sowie den langjährigen Erfahrungen der Sinterexperten und bleibt für alle Sinterteile unverändert (siehe Abschnitt 4.1). Trotzdem ist die Kenntnis des Einflusses der genannten Parameter auf die mechanischen Eigenschaften von Lasersinterteilen wichtig, und wird nachfolgend ausführlich diskutiert, um die Ursachen von eventuell vorhandenen Sinterfehlern in den im weiteren Verlauf dieser Arbeit analysierten Probestäben und Bauteilen identifizieren zu können.

### **Einfluss des Belichtungsparameters – Laserleistung**

Die Laserleistung beeinflusst unmittelbar die Parameter Streckenenergie, Flächenenergie und Energiedichte. Hohe Laserleistungen verringern die Porosität der Bauteile und führen zu einer höheren Dichte. Dies wirkt sich positiv auf die mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten Bauteilen aus. Eine Steigerung der Laserleistung bewirkt allerdings auch eine Vergrößerung der Wärmeeinflusszone, was zu vermehrter Partikelanhaftung am Sinterteil und damit zu einer Verschlechterung der Detailgenauigkeit führt (siehe Abbildung 3.15) [18].

Der Einfluss der Laserleistung auf die Porosität der Bauteile ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Im linken Teilbild ist zu erkennen, dass die einzelnen Pulverpartikel nicht vollständig ineinandergeflossen sind, da an einigen Stellen die frühere Kontur der Pulverkörner noch zu erkennen ist. Mithilfe von mikroskopi-

schen Untersuchungen und Abbildung 3.11 kann die Qualität von Lasersinterbauteilen beurteilt werden, in dem die Bruchflächen der Sinterproben/-bauteile mit den bereitgestellten Bildern verglichen werden.

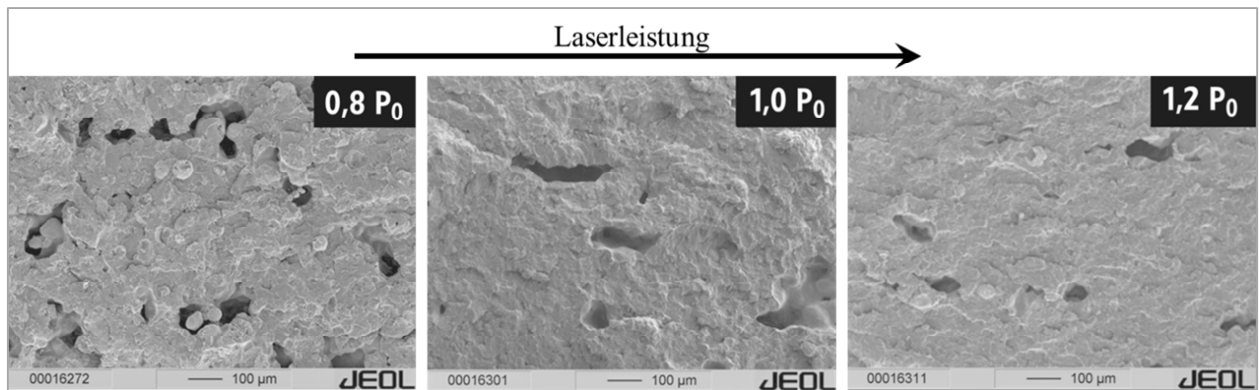


Abbildung 3.11: Einfluss der Laserleistung auf die Porosität von Sinterbauteilen aus ungefülltem PA 12 gemäß [18] ( $P_0$  ist die optimale Laserleistung)

### **Einfluss des Belichtungsparameters – Spurversatz**

Kaddar [47] hat in seinen Untersuchungen gezeigt, dass der Spurversatz bei gleichbleibender Laserleistung und gleicher Scangeschwindigkeit die mechanischen Eigenschaften des Bauteils beeinflusst. Grundsätzlich ergeben sich bei größerem Versatz schlechtere mechanische Eigenschaften, da die mittlere Energiedichte pro Flächeneinheit kleiner wird. Der Einfluss auf die Zugfestigkeit ist etwas stärker ausgeprägt als die Beeinflussung des E-Moduls. Des Weiteren haben die Untersuchungen von Kaddar [47] gezeigt, dass die kumulierte thermische Belastung des Pulvers bei sehr kleinen Zeilenabständen, kurzen Scanlängen und konstanter Laserleistung zu hoch sein kann. Dies führt zu Zersetzungserscheinungen an der Materialoberfläche einer Schicht und Sinterbauteilen mit verminderten mechanischen Eigenschaften. Annähernd gleichbleibende Werkstoffkennwerte können erzielt werden, wenn die Laserleistung an den gewählten Linienabstand angepasst wird. Auf diese Weise bleibt die mittlere Energiedichte pro Flächenelement konstant [47].

### **Einfluss des Belichtungsparameters – Scangeschwindigkeit**

Die Scangeschwindigkeit beeinflusst sowohl die mechanischen Eigenschaften als auch die Baukosten eines Sinterbauteils. Da beide Einflüsse gegenläufig sind, muss ein Kompromiss gefunden werden. Zum einen hat eine hohe Scangeschwindigkeit eine kurze Bauzeit zur Folge, und zum anderen verschlechtern sich die mechanischen Eigenschaften mit steigender Belichtungsgeschwindigkeit, wenn die Laserleistung unverändert bleibt [22]. Diese Erkenntnisse werden durch die Untersuchungen von Kaddar [47] bestätigt. Durch eine Versechsfachung der Scangeschwindigkeit von 400 auf 2400 mm/s ergab sich bei konstanter Laserleistung ein Festigkeitsabfall von knapp 94 %. Außerdem hat er festgestellt, dass sich Proben, die mit einer hohen Scangeschwindigkeit gesintert wurden, weich und spröde verhalten, wohingegen langsam belichtete Proben wesentlich fester und zäher sind [47]. Eine zu geringe Scangeschwindigkeit bewirkt jedoch, dass zuvor gescannte Bereiche stark abkühlen, bevor die nächste Zeile belichtet wird, was dann wiederum zu schlechteren mechanischen Eigenschaften führt, da sich der Verbindungsdurchmesser erheblich verringert [22].

Da der Schmelzvorgang zeitabhängig ist, ist es nicht möglich, die Laserleistung und die Scangeschwindigkeit beliebig zu erhöhen, auch wenn die eingebrachte Energie auf diese Weise konstant gehalten werden kann. Durch die Zeitabhängigkeit des Schmelzvorgangs ergibt eine hohe Energiedichte in Verbindung mit einer hohen Scangeschwindigkeit trotzdem schlecht aufgeschmolzene Ergebnisse. Darüber hi-



naus kann es sein, dass die obersten Partikel der Pulverschicht bei sehr hohen Laserleistungen verbrennen [22]. In gewissen Grenzen ist eine derartige Kompensation jedoch möglich, was Kaddar [47] in seinen Untersuchungen bestätigt. Durch die konstant gehaltene Energiedichte konnte er die maximale Zugfestigkeitsdifferenz im Bereich von 900 bis 2400 mm/s Scangeschwindigkeit von ca. 93 % bei konstanter Laserleistung auf ca. 1,5 % bei konstanter Streckenenergie verringern.

### **Einfluss des Belichtungsparameters – Schichtdicke**

Die realisierbare Schichtdicke ist abhängig von der Körnung des Pulvers, der verwendeten Sinteranlage sowie von den mechanischen und optischen Anforderungen, die an das Bauteil gestellt werden. Zum Sintern von PA 12 wird in der Regel eine Schichtdicke von ca. 0,1 mm verwendet [47]. Bauteilflächen, die weniger als  $20^\circ$  zur XY-Ebene geneigt sind, zeigen deutliche Schichtbaustufen (siehe Abschnitt 3.2) [78]. Abbildung 3.12 stellt den beschriebenen Effekt in Abhängigkeit vom Neigungswinkel der Fläche dar. Die Stufung innerhalb der Fläche bei geringer Neigung ist deutlich zu erkennen. Mit steigendem Neigungswinkel wird die Länge der Stufen immer kleiner, sodass der Effekt nicht mehr so deutlich zu erkennen ist.

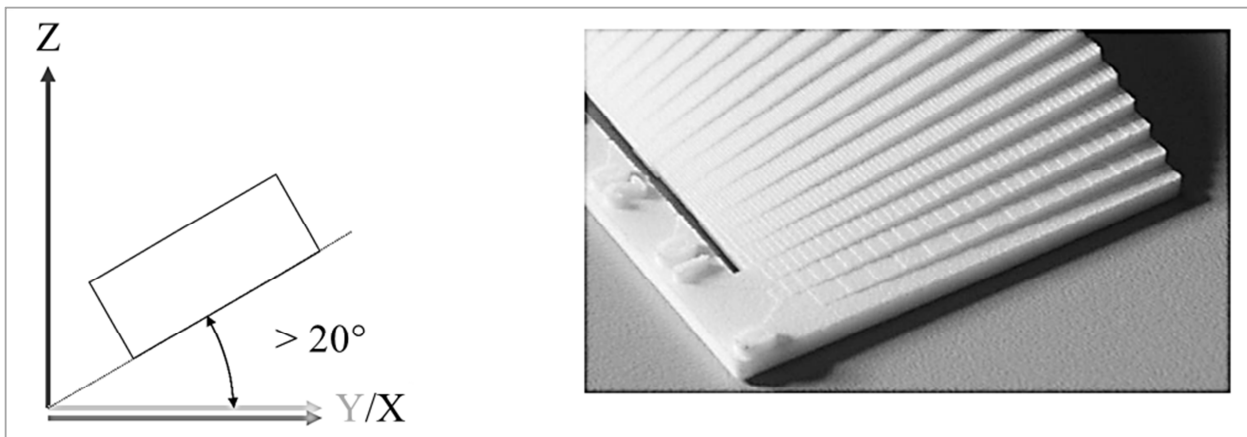


Abbildung 3.12: Stufeneffekt beim Lasersintern in Abhängigkeit vom Neigungswinkel einer Fläche [78]

Die Schichtdicke hat direkten Einfluss auf die mechanischen und optischen Eigenschaften sowie auf die Bauzeit. Auch bezüglich der Festlegung dieses Parameters muss ein Kompromiss gefunden werden. Hierbei sollten die Bauteilanforderungen im Vordergrund stehen. Bei gleichbleibender Laserleistung sinkt die Energiedichte im Pulverbett mit steigender Schichtdicke, was zu einer Verringerung der Zugfestigkeit, des E-Moduls und der Bruchdehnung führt. Auch dieser Effekt kann verringert werden, wenn die Energiedichte konstant gehalten wird [47].

### **Einfluss des Belichtungsparameters – Energiedichte**

Die zuvor zusammengefassten Untersuchungen verdeutlichen, dass die Laserleistung, der Linienabstand, die Scangeschwindigkeit und die Schichtdicke erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben. Jedoch zeigen die Ergebnisse auch, dass die Beeinflussung drastisch reduziert werden kann, wenn die Streckenenergie und die Energiedichte ( $E_F$ ) konstant gehalten werden. Der Einfluss der Energiedichte auf die mechanischen Eigenschaften wurde von Kaddar [47] ebenfalls untersucht. Die Versuche haben ergeben, dass die Zugfestigkeit anfangs mit steigender Energiedichte zunimmt. Mit weiter steigender Energiedichte werden die Festigkeitszuwächse allerdings immer geringer. Die Zugfestigkeit erreicht dann ein Maximum und fällt bei weiterer Steigerung sogar wieder ab [47]. Der Festigkeitsabfall bei zu hohen Energiedichten kann auf die thermische Schädigung des Materials zurückgeführt werden. Griessbach [18] beschreibt, dass durch die Optimierung der Energiezufuhr Bauteile hergestellt werden können, deren

Eigenschaften nahezu isotrop sind, da sich auf diese Weise der Festigkeitsverlust in Z-Richtung minimieren lässt. Durch die Verwendung einer optimierten Belichtungsstrategie kann mit ungefülltem Polyamid 12 Sinterpulver lageunabhängig eine Zugfestigkeit von mehr als 50 MPa erreicht werden [18]. Auch Wegner [85] hat gezeigt, dass durch eine Erhöhung der Energiedichte die Abweichungen in den mechanischen Eigenschaften in Z-Richtung, die sich aus der inhomogenen Vorwärmtemperatur im Bauraum ergeben, reduziert werden können.

### 3.4.3 Scanstrategie

Grundsätzlich werden zwei Scanstrategien unterschieden. Bei der Parallel-Strategie wird der Laser immer parallel zur X- oder Y-Achse geführt, sodass alle Belichtungslinien parallel zueinander verlaufen (siehe Abbildung 3.13 links). Im Gegensatz dazu wird die Belichtungsrichtung bei der Kreuz-Strategie in jeder Schicht um  $90^\circ$  gedreht, sodass sich die Sinterlinien von Schicht zu Schicht im rechten Winkel schneiden. In der Praxis wird meist die Kreuz-Strategie verwendet [71].

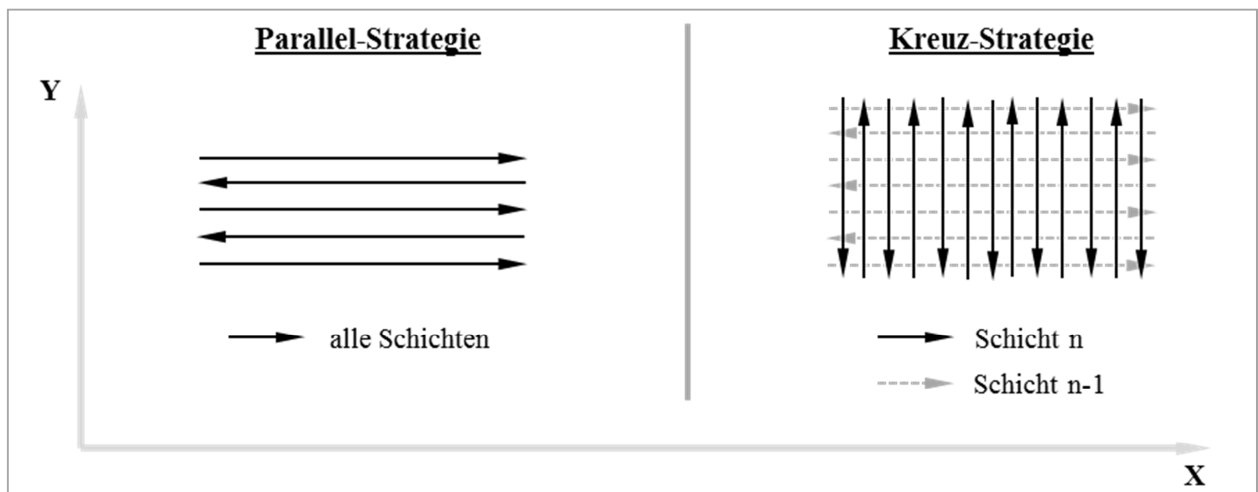


Abbildung 3.13: Parallel- und Kreuz-Strategie beim Lasersintern von Kunststoffen

In welcher Weise die gewählte Scanstrategie die Festigkeit von lasergesinterten Bauteilen aus ungefülltem PA 12 beeinflusst, wurde von Kaddar [71] und Sauer [86] analysiert. Die Untersuchungen zeigen, dass Probekörper, die durch den Einsatz der Parallel-Strategie hergestellt werden, auch in der XY-Ebene eine deutliche Anisotropie zeigen. Bei parallel zur X-Achse verlaufender Belichtungsrichtung besitzen die in Y-Richtung orientierten Probestäbe eine um 7 % höhere Festigkeit als die in X-Richtung orientierten Proben. Der Grund hierfür sind die unterschiedlich langen Sinterlinien und die daraus resultierenden Abkühlzeiten der einzelnen Punkte einer Sinterlinie. Die Sinterlinien der Y-Proben sind wesentlich kürzer als die der X-Proben. Dadurch hat ein Punkt einer Y-Probe weniger Zeit abzukühlen, bevor die nächste Zeile gescannt wird. Auf diese Weise verbinden sich die einzelnen Zeilen besser miteinander, was zu einer höheren Zugfestigkeit führt. Mithilfe der Kreuz-Strategie wurden in X- und Y-Richtung annähernd gleiche Werte erzielt. Die gemessene Zugfestigkeit dieser Proben lag zwischen den Werten der X- und Y-Proben, die mit Parallel-Strategie gescannt wurden [71] [86]. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Ausrichtung von ungefüllten Probekörpern aus PA 12 in parallel zur Bauplattform verlaufenden Ebenen keinen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit hat, wenn die Kreuz-Strategie verwendet wird. In Abschnitt 5.2 wird ausführlich diskutiert, ob dies auch für glasgefülltes PA 12 gilt. Dieser Schritt ist notwendig, um die anisotropen Materialeigenschaften von lasergesinterten Bauteilen korrekt in FEM-Simulationen abbilden zu können (siehe Kapitel 6.6).

### 3.4.4 Bauraumtemperatur

Der gesamte Bauraum und die oberste Pulverschicht werden vor der Belichtung durch eine integrierte Heizung erwärmt [22]. Das Prozessfenster der Bauraumtemperatur für das Lasersintern von teilkristallinen Werkstoffen, wie dem in dieser Arbeit verwendeten PA 12, liegt oberhalb der Kristallisationstemperatur ( $T_c$ ) und wenige Grad unterhalb der Schmelztemperatur ( $T_m$ ) (siehe Abbildung 3.14) [87].

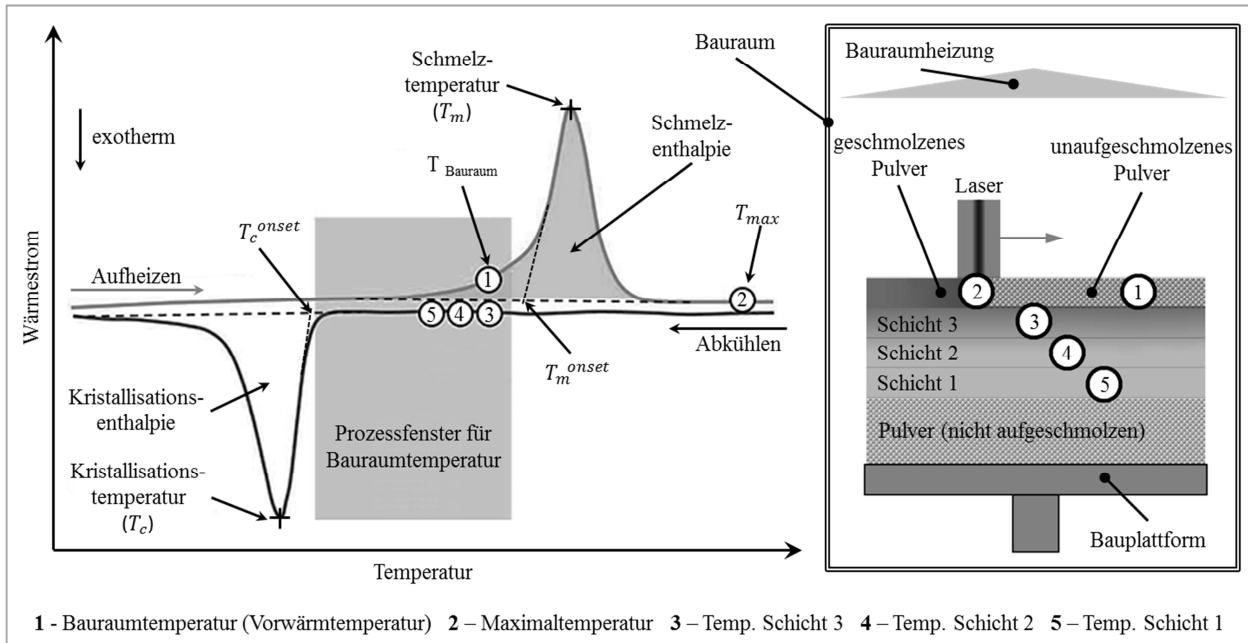


Abbildung 3.14: Schematischer Verlauf einer Wärmestromkurve aus einer DSC-Messung eines teilkristallinen Thermoplasten mit Kennzeichnung des Temperaturbereichs für die Bauraumtemperatur beim Lasersintern und thermische Situation im Bauraum einer Lasersinteranlage gemäß [29] [88]

Die Grenztemperaturen des gekennzeichneten Temperaturbereichs sind nach unten die Onset-Temperatur der Kristallisation  $T_c^{onset}$  und nach oben die Onset-Temperatur des Aufschmelzens  $T_m^{onset}$  [89]. Zwischen diesen Temperaturen kann das viskose Fließen des Kunststoffs lokal durch den Laserstrahl induziert werden. Jedoch setzt die Verfestigung durch Kristallisation noch nicht ein. Die Lage des Temperaturbereichs kann mithilfe der in Unterabschnitt 2.5.1 bereits erwähnten Differential Scanning Calorimetry (DSC) für jeden Polymerwerkstoff individuell bestimmt werden [90] [91]. Die optimale Bauraumtemperatur für die Verarbeitung von PA 12 liegt je nach Maschine und individuellen Einstellungen zwischen 169 und 178 °C [13] [22] [87]. Der ideale Sinterprozess erreicht den theoretischen Zustand des quasi-isothermen Lasersinterns. In einem derartigen Prozess wird durch den Laserstrahl lediglich die Wärmeenergie zugeführt, die zum Überschreiten des Phasenübergangs benötigt wird. Auf diese Weise kann die zuzuführende Wärmeenergie auf ein Minimum reduziert werden, was dazu führt, dass im umliegenden Pulverbett nur sehr geringe Temperaturerhöhungen auftreten. Dies ist wichtig, da eine zu hohe Temperaturerhöhung im umliegenden Pulver zu vermehrter Pulveranhaftung und einer geringeren geometrischen Bauteilgenauigkeit infolge von seitlichem Zuwachs führt (siehe Abbildung 3.15). Bei quasi-isothermer Prozessführung liegen Schmelze und Pulver in einem Zwei-Phasen-Mischgebiet nebeneinander vor. Um sich diesem theoretischen Idealzustand anzunähern, wird die Bauraumtemperatur der Onset-Temperatur des Aufschmelzens angenähert. Dadurch kann die Energie des Laserstrahls zum großen Teil zur Einbringung der Schmelzenthalpie genutzt werden, da lediglich ein kleiner Teil zur Temperaturerhöhung des Pulverbetts benötigt wird [89] [92]. Die Bauteilkontur wird im Zwei-Phasen-Mischgebiet durch die Phasengrenze zwischen dem aufgeschmolzenen und dem nicht aufgeschmolzenen Pulver beschrieben. Ihre Ausprägung ist von den thermischen Eigenschaften des Pulvers abhängig. Relevant sind die Schmelzen-

thalpie, die Breite des Schmelzbereichs sowie der Abstand zwischen dem Beginn des Aufschmelzens und dem Beginn der Kristallisation. Diese Parameter beeinflussen die Prozessführung und die Konturschärfe des Bauteils [29].

Der rechte Teil der Abbildung 3.14 zeigt die thermische Situation im Inneren des Bauraums einer Lasersinteranlage. Die charakteristischen Temperaturen sind zusätzlich in der DSC-Kurve eingetragen. Punkt 1 kennzeichnet das nicht aufgeschmolzene Pulver der obersten Schicht, das bereits auf Bauraumtemperatur vorgewärmt wurde. Im Punkt 2 herrscht die höchste Temperatur ( $T_{max}$ ), die im Sinterprozess erreicht wird, sie muss oberhalb der Schmelztemperatur des verwendeten Werkstoffs liegen. Die Pulverkörner schmelzen durch die zusätzlich vom Laser eingebrachte Wärmeenergie auf. Die Punkte 3, 4 und 5 kennzeichnen die Temperaturen der zuvor gesinterten Schichten. Diese kühlen in der Regel etwas ab, da die Bauraumtemperatur durch Wärmeverluste und die größere Entfernung zur Bauraumheizung nach unten hin etwas abnimmt [88].

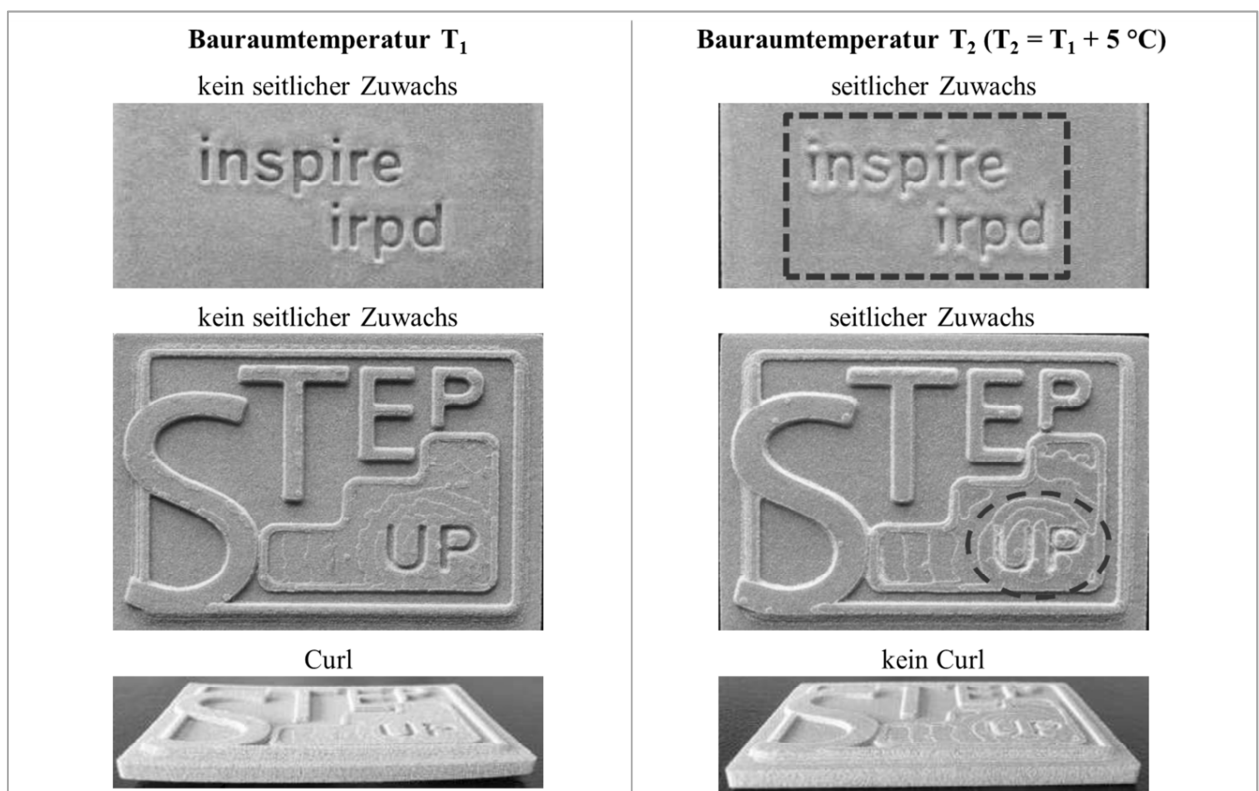


Abbildung 3.15: Seitlicher Zuwachs und Curl aufgrund von hoher bzw. niedrigerer Bauraumtemperatur [88]

Die exakte Temperaturführung ist eine der größten Herausforderungen beim generativen Lasersintern, da bereits kleine Abweichungen von der optimalen Temperatur großen Einfluss auf die Qualität des späteren Bauteils haben können [22]. Die Grenzwerte des in Abbildung 3.14 gekennzeichneten Prozessfensters dürfen im Sinterprozess nicht verletzt werden. Bei der Verletzung der oberen Grenze wird das bisher nicht vom Laserstrahl aufgeschmolzene Pulver angeschmolzen, und es kommt zum Zusammenbacken des gesamten Pulverbetts. Dieser Vorgang wird Caking genannt. Wird der untere Grenzwert temporär unterschritten, kommt es infolge der schichtweise und frühzeitig beginnenden Kristallisation zu starkem Verzug der Sinterteile, dem sogenannten Curl (siehe Abbildung 3.15) [16] [89]. Curl entsteht, weil die Schicht  $n$ , mit der die Schicht  $n+1$  versintert wird, die Volumenreduktion der Schicht  $n+1$  behindert. Auf diese Weise entstehen Spannungen zwischen den einzelnen Schichten, die zu Verzug führen können [43]. Des Weiteren führt eine zu geringe Pulverbetttemperatur dazu, dass das Pulver nur unvollständig aufschmilzt, was schlechte mechanische Eigenschaften und eine erhöhte Porosität zur Folge hat (siehe

Abschnitt 2.6) [16]. In der Praxis wird die Bauraumtemperatur sehr nah an der Onset-Temperatur des Schmelzens geführt, um ein vorzeitiges und unkontrolliertes Einsetzen des Kristallisationsprozesses zu vermeiden. Der Grund hierfür ist die Abhängigkeit der Onset-Temperatur der Kristallisation von der Abkühlgeschwindigkeit. Sie verschiebt sich mit abnehmender Kühlrate zu höheren Temperaturen und verkleinert somit das Prozessfenster [13]. Mithilfe einer lokal und zeitlich optimierten Temperaturführung im Inneren des Bauraums ist es möglich, nahezu verzugsfreie Teile herzustellen. Der Verzug durch spontanes und ungleichmäßiges Abkühlen nach dem Aufschmelzen kann durch eine möglichst hohe Bauraumtemperatur minimiert werden. Die beim SLS erreichbare geometrische Bauteilgenauigkeit ist vergleichbar mit der des Spritzgießprozesses [18] [22]. Dieser Punkt ist hinsichtlich der Verifizierbarkeit von Simulationsergebnissen durch Versuche an lasergesinterten Prototypen und der Ableitung des quantitativen Zusammenhangs von großer Bedeutung. Eine Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnis und Bauteilversuch und die Herstellung eines Zusammenhangs ist nur möglich, wenn Bauteile mit gleichen Abmessungen untersucht werden. Hierfür ist es wichtig, dass die Reproduzierbarkeit der Bauteilgenauigkeit für beide Fertigungsverfahren vergleichbar ist.

Bereits kleine Schwankungen in der Bauraumtemperatur haben signifikanten Einfluss auf die Porosität und andere mechanische Eigenschaften. Der Grund für den großen Einfluss ist, dass eine Schwankung von 2 °C bezogen auf die wenigen Grad (3-4 °C), die die Bauraumtemperatur unterhalb der Schmelztemperatur des Werkstoffs liegt, prozentual gesehen eine erhebliche Abweichung bedeutet [16]. Eine Abweichung von der optimalen Bauraumtemperatur von nur einem Grad Celsius nach unten kann einen Festigkeitsverlust von ca. 10 % zur Folge haben. Zu hohe Bauraumtemperaturen lassen das Material schneller altern. Thermisch gealtertes Material (siehe Unterabschnitt 3.5.4) besitzt einen höheren Schmelzpunkt, was dazu führen kann, dass nicht aufgeschmolzene Partikel (siehe Unterabschnitt 2.6.1) im späteren Bauteil vorhanden sind [14] [18]. Die Charakterisierung der eingesetzten Sintermaterialien in Kapitel 5 zeigt sehr deutlich, wie groß der Einfluss von nicht aufgeschmolzenen Partikeln auf die mechanischen Eigenschaften ist.

### **3.4.5 Umgebung**

Um die Oxidation des Sinterpulvers in Verbindung mit dem Luftsauerstoff zu verhindern, wird die Prozesskammer der Sinteranlage mit Stickstoff geflutet [16]. Der Stickstoffanteil liegt bei ca. 98 % [22]. Der Sinterprozess findet bei Umgebungsdruck statt. Aus diesem Grund ist die Porosität von Lasersinterteilen größer und die erzielbare Dichte geringer als beim SG [4]. Dies hat zur Folge, dass additiv gefertigte Lasersinterbauteile im Vergleich zu spritzgegossenen eine geringere Festigkeit und höhere Sprödigkeit besitzen (siehe Abschnitt 2.6) [92].

### **3.4.6 Ende des Bauprozesses**

Das nicht aufgeschmolzene Pulver verbleibt bis zum Ende des Sinterprozesses im Bauraum, um die erzeugte Schmelze abzustützen. Der gesamte Baurauminhalt aus hochviskoser Schmelze und nicht aufgeschmolzenem Pulver wird erst abgekühlt, wenn alle Schichten der Bauteile erzeugt wurden. Die Abkühlung erfolgt im Hinblick auf die Vermeidung von Eigenspannungen und Verzug sehr langsam. Die Abkühlzeit von Lasersinterteilen liegt im Vergleich zu Spritzgießbauteilen nicht im Bereich von Minuten, sondern im Bereich von mehreren Stunden [4] [16] [50] [87] [93]. Die maximal erreichbare Abkühlrate

wird dabei durch die Wärmeleitfähigkeit des Pulverbetts und den Wärmeübergangswiderstand zwischen den Pulverkörnern bestimmt (siehe thermische Eigenschaften in Unterabschnitt 3.5.1) [16] [94].

Die im Pulverblock enthaltene Schmelze erstarrt bei Unterschreitung der Kristallisationstemperatur. Für die Eigenschaften des Sinterbauteils ist es von Vorteil, wenn der gesamte Pulverblock solange bei der Kristallisationstemperatur gehalten wird, bis die Phasenumwandlung vollständig abgeschlossen ist. Dies wird durch eine gezielte Variation der Abkühlrate erreicht. Sie darf lediglich so groß sein, dass die freiwerdende Kristallisationsenthalpie das Bauteil im Inneren des Pulverblocks bis zum Abschluss der Phasenumwandlung auf konstanter Temperatur hält [50]. Nach der vollständigen Abkühlung wird der Pulverblock aus der Sinterkammer entnommen. Zur Entformung werden die Bauteile vom nicht versinterten Pulver, dem sogenannten Partcake, getrennt. Üblicherweise ergibt sich ein Partcake-Anteil von 30 bis 70 %, wobei aus Kostengründen stets versucht wird, diesen Anteil so gering wie möglich zu halten [89].

Der komplexe Abkühlvorgang ist einer der Gründe, warum es schwierig ist, mithilfe des Lasersinterns Bauteile herzustellen, die immer exakt die gleichen Eigenschaften haben. Das Problem liegt darin, dass die Bauteile in der Mitte des Bauraums eine wesentlich geringere Abkühlrate haben als die Teile am Rand [72]. Dies führt dazu, dass die Bauteile in der Mitte des Bauraums einen höheren Kristallisationsgrad und damit eine höhere Dichte aufweisen. Somit haben diese Teile geringfügig andere mechanische Eigenschaften als die Bauteile vom Rand des Bauraums, obwohl alle Bauteile im selben Baujob und mit den gleichen Maschineneinstellungen hergestellt wurden. Der in diesem Zusammenhang wichtige Einfluss der Fertigungscharge auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von lasergesinterten Probestäben wird in Abschnitt 5.6 diskutiert.

### 3.5 Werkstoffauswahl

Damit ein Polymer im Lasersinterprozess verarbeitet werden kann, muss eine ideale Kombination verschiedener Basiseigenschaften vorliegen [13]. Die wichtigsten Parameter der Hauptgruppe Werkstoffauswahl sind in Abbildung 3.16 dargestellt.

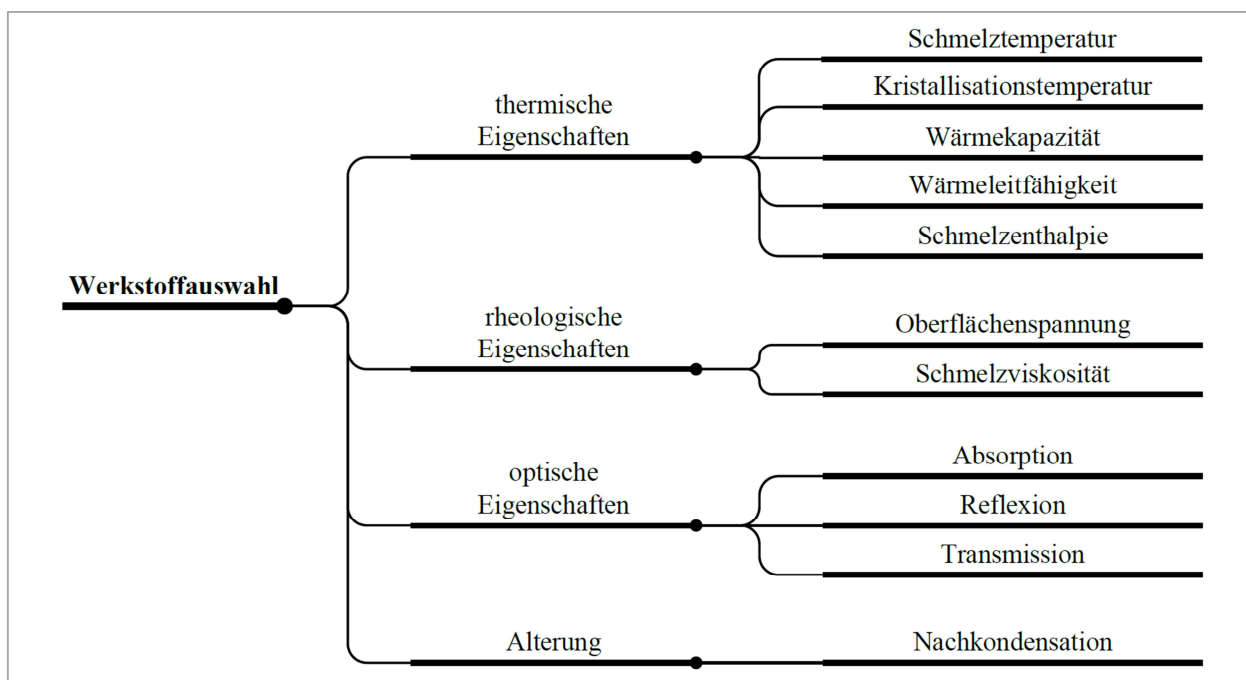


Abbildung 3.16: Parameter der Hauptgruppe polymerspezifische Eigenschaften

### 3.5.1 Thermische Eigenschaften

Das temperaturabhängige Verhalten von thermoplastischen Polymeren wurde bereits in Unterabschnitt 2.5.1 erläutert. Für die Eignung eines Polymers für das Selektive Lasersintern sind jedoch andere thermische Eigenschaften ausschlaggebend.

#### Schmelz- und Kristallisationstemperatur

Der Lasersinterprozess findet thermodynamisch gesehen im metastabilen Bereich der unterkühlten Schmelze statt. In diesem Bereich können die Phasen flüssig und fest nebeneinander vorliegen [13]. Die Bauraumtemperatur beim Lasersintern von teilkristallinen Thermoplasten liegt zwischen der Onset-Temperatur der Kristallisation  $T_c^{onset}$  und der Onset-Temperatur des Aufschmelzens  $T_m^{onset}$  (siehe Abbildung 3.14 auf Seite 46). Deshalb sind teilkristalline Polymere, bei denen die Differenz zwischen Schmelz- und Erstarrungstemperatur möglichst hoch ist, besonders gut für die Verarbeitung durch Lasersintern geeignet. Je höher die Differenz, desto geringer der Schwund beim Erstarren und umso höher die Maßhaltigkeit des Bauteils. Die Erstarrungstemperatur von reinen Polymeren ist durch die physikalischen Grunddaten festgelegt und kann lediglich durch den Zusatz von Additiven oder Comonomeren abgesenkt werden. Die Schmelztemperatur des Pulvers kann durch Kristallmodifikationen oder die Erhöhung des Kristallisationsgrads angehoben werden [50]. Auf keinen Fall darf es bei dem verwendeten Werkstoff eine Überschneidung von Schmelz- und Erstarrungspeak geben. Eine derartige Überschneidung würde bedeuten, dass der Beginn der Kristallisation nicht durch eine gezielte Temperaturführung gesteuert werden kann. Darüber hinaus stellt eine niedrige Schmelztemperatur grundsätzlich geringere Anforderungen an die thermische Isolation einer Sinteranlage. Diese wird mit steigender Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur immer aufwendiger [95].

#### Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit von Sinterpulvern sind temperaturabhängig. Generell nimmt die spezifische Wärmekapazität eines teilkristallinen Thermoplasts im Feststoffzustand mit steigender Temperatur zu. Dies gilt auch für Pulverschüttungen. Die Wärmeleitfähigkeit einer PA 12 Pulverschüttung steigt mit zunehmender Temperatur. Dieser Effekt ist auf die sich reduzierende Porosität des Pulverbetts und die daraus resultierende höhere Dichte bei steigender Temperatur zurückzuführen. Im Gegensatz dazu sinkt die Wärmeleitfähigkeit eines teilkristallinen Kunststoffes im Festzustand bei steigender Temperatur, was auf die höhere Mobilität der Moleküle und den damit verbundenen Anstieg des freien Volumens zurückzuführen ist [48] [94]. Eine geringe Wärmeleitfähigkeit sorgt für eine lokale Begrenzung der Sinterzone und minimiert den seitlichen Zuwachs (siehe Abbildung 3.15 auf Seite 47), da ausschließlich die belichteten Pulverkörner aufschmelzen [31]. Somit verbessert eine geringe Wärmeleitfähigkeit die geometrische Bauteilgenauigkeit. Allerdings ist eine niedrige Wärmeleitfähigkeit nachteilig für das vollständige Aufschmelzen aller Partikel in Dickenrichtung der Schicht, da nur die obersten Körner einer Schicht unmittelbaren Kontakt zur einwirkenden Strahlung haben. Die darunterliegenden müssen durch Wärmeleitung aufgeschmolzen werden (siehe Unterabschnitt 3.5.3).

#### Schmelzenthalpie

Sowohl die Schmelzenthalpie als auch die Breite des Schmelzpeaks beeinflussen die Eignung eines Polymers für den Sinterprozess. Diese beiden Eigenschaften definieren die Phasengrenze zwischen fester und flüssiger Phase. Eine hohe Schmelzenthalpie und eine geringe Breite des Schmelzpeaks begünstigen

die Wirksamkeit des quasi-isothermen Lasersinterprozesses (siehe Unterabschnitt 3.4.4) und führen zu Bauteilen mit hoher Konturschärfe [29]. Eine hohe Schmelzenthalpie verhindert das Aufschmelzen von Pulverkörnern, die unmittelbar an aufgeschmolzene Bereiche angrenzen, da die Wärmeenergie, die durch Wärmeleitung aus den aufgeschmolzenen Bereichen eingebracht wird, dann in der Regel kleiner ist als die benötigte Schmelzenthalpie. Eine hohe Schmelzenthalpie verhindert also, dass außerhalb des gewünschten Bereichs ein Sintern stattfindet [50].

### 3.5.2 Rheologische Eigenschaften

Thermoplastische Polymerschmelzen sind strukturviskose Flüssigkeiten. Allerdings kann diese für den Spritzgießprozess vorteilhafte Materialeigenschaft beim Lasersintern nicht ausgenutzt werden. Im Gegensatz zum Spritzgießen, bei dem die Polymerschmelze in der Schnecke und während der Formfüllung stark geschert wird, werden im Sinterprozess, außer durch die Schwerkraft, keine Scherkräfte in die Polymerschmelze eingebracht. Deshalb erfolgt die Verarbeitung sehr nahe bei der Nullviskosität ( $\eta_0$ ) des Polymers (siehe Abbildung 3.17). Für den Sinterprozess gilt: je geringer die Schmelzviskosität, desto vollständiger das Zusammenfließen der nacheinander aufgeschmolzenen Pulverpartikel [13].

Eine niedrige Oberflächenspannung begünstigt ebenfalls das Zusammenfließen (siehe Abbildung 2.9) und die Durchdringung der Schmelzphasen. Sowohl eine geringe Schmelzviskosität als auch eine niedrige Oberflächenspannung führen zu einer geringeren Porosität im späteren Sinterteil und damit zu besseren mechanischen Eigenschaften [31] [48] [92]. Die Schmelzviskosität von Sinterpolyamiden wird durch Alterungsvorgänge negativ beeinflusst (siehe Unterabschnitt 3.5.4).

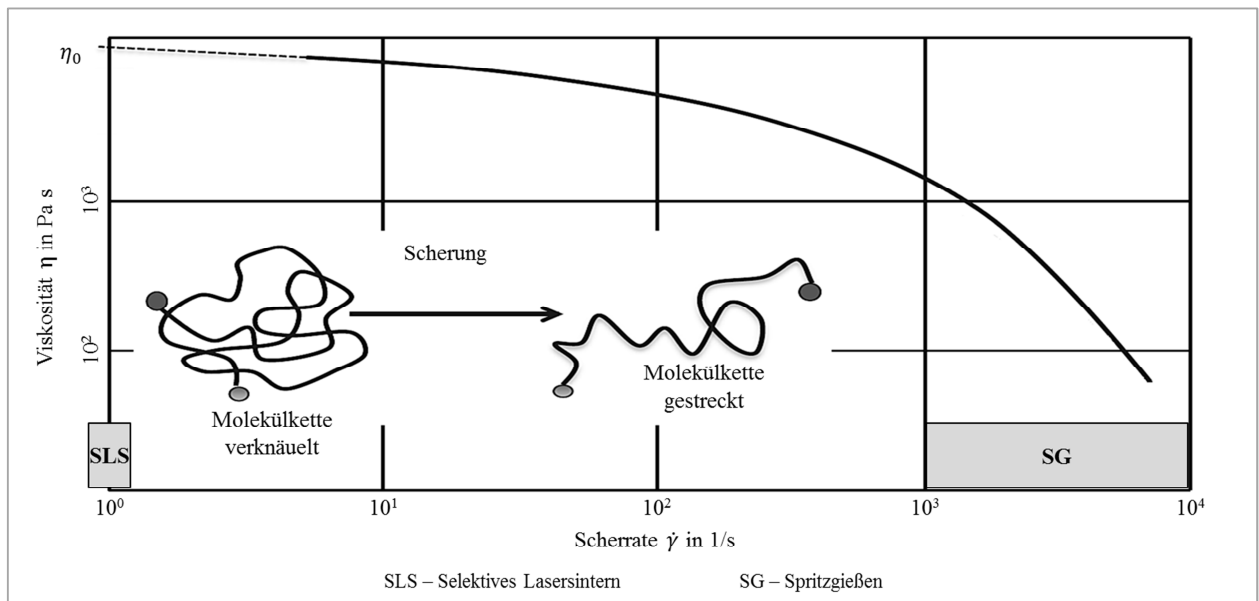


Abbildung 3.17: Schematische Darstellung einer Viskositätskurve eines thermoplastischen Polymers gemäß [13]

### 3.5.3 Optische Eigenschaften

Die optischen Eigenschaften von Polymeren werden durch den strukturellen Aufbau der kettenförmigen Makromoleküle bestimmt. Ihre optische Reaktivität wird durch den Typ und die Verknüpfungsart der Atome in der Grundmolekulkette, die Art der Endgruppe und Substitutionen, die Art und Länge der Verzweigungen sowie die Molmasse und den Einbau von Fremdatomen bestimmt [43]. Um die Kunststoff-



partikel im Lasersinterprozess aufzuschmelzen, muss die Energie der Laserstrahlung in das Pulverbett eingebracht werden. Für diesen Vorgang ist das Absorptionsvermögen des Polymers die optische Materialeigenschaft, die den Sinterprozess signifikant beeinflusst. In Abhängigkeit von der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung treten unterschiedliche Absorptionsmechanismen auf. Bei der Verwendung eines CO<sub>2</sub>-Lasers, wie in Lasersinteranlagen üblich (siehe Unterabschnitt 3.4.1), erfolgt die Wechselwirkung zwischen der Laserstrahlung und den Makromolekülen des Polymers. Es werden dabei verschiedene Schwingungsformen der Polymerkette angeregt [43]. Im Belichtungsprozess wird allerdings nur ein Teil der auftreffenden Strahlungsenergie des Lasers durch Absorption in Wärme umgewandelt. Der restliche Anteil wird transmittiert oder reflektiert. Die auftreffende Laserstrahlung ( $P_L$ ) teilt sich gemäß Gleichung (3.2) auf [82].

$$P_L = P_R + P_T + P_A \quad (3.2)$$

mit:

- $P_L$  = auftreffende Laserleistung
- $P_R$  = reflektierter Leistungsanteil
- $P_T$  = transmittierter Leistungsanteil
- $P_A$  = absorbierter Leistungsanteil

Rietzel [92] hat in Messungen festgestellt, dass PA 12-Sinterpulver bis zu 60 % der auftreffenden Strahlleistung absorbiert (siehe Abbildung 3.18). Die Absorption der Laserstrahlung findet im oberflächennahen Bereich statt. Mit zunehmender Eindringtiefe ( $z_{Ein}$ ) sinkt die Intensität der Strahlung, da sie vom Material absorbiert und in innere Energie umgewandelt wird (siehe Abbildung 3.19) [82].

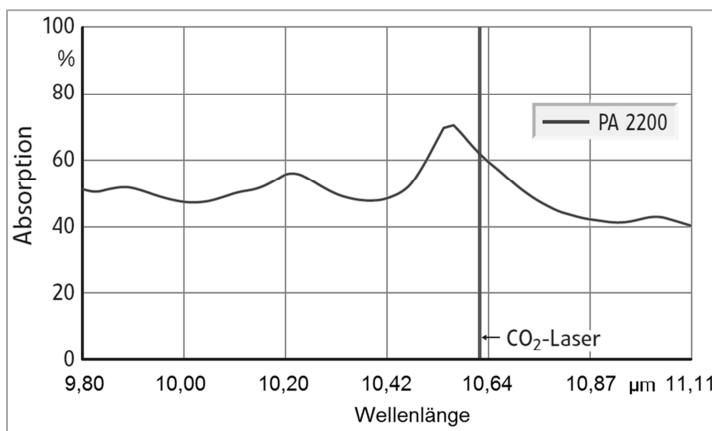


Abbildung 3.18: Absorptionsvermögen von ungefülltem PA 12-Sinterpulver [92]

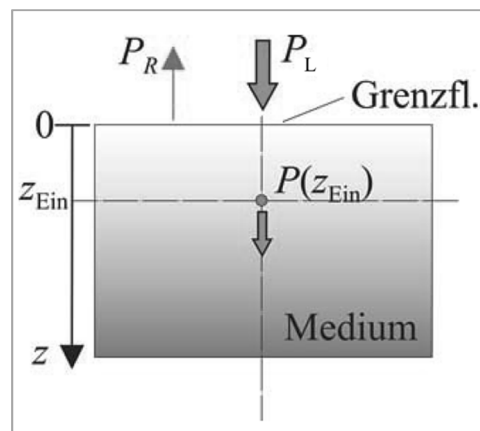


Abbildung 3.19: Größen der Absorption von Laserstrahlung gemäß [82]

Der Vorgang der Absorption von Laserstrahlung und die exponentielle Schwächung der auftreffenden Strahlung kann mithilfe des Beer-Lambertschen Absorptionsgesetzes gemäß Gleichung (3.3) beschrieben werden [48] [82].

$$P_{(z_{Ein})} = (P_L - P_R) \cdot e^{-\alpha \cdot z_{Ein}} \quad (3.3)$$

mit:

- $z_{Ein}$  = Distanz von der Bauteiloberfläche zur betrachteten Eindringtiefe
- $P_{(z_{Ein})}$  = Leistung in Abhängigkeit von der Eindringtiefe (siehe Abbildung 3.19)
- $\alpha$  = Linearer Absorptionskoeffizient (abhängig von der Beschaffenheit des Pulvers, der Packungsdichte und der Pulvertemperatur)

Die weitere Ausbreitung der absorbierten Energie im Inneren der Pulverschicht erfolgt durch Wärmeleitung. Nur wenn ein Teil der eingebrachten Energie in Baurichtung (Z-Richtung) bis mindestens zur vorangegangenen Schicht transportiert wird, können sich die beiden Schichten richtig miteinander verbinden [13]. Durch die Abnahme der Energie in Dickenrichtung besteht jedoch grundsätzlich die Gefahr, dass die unteren Partikel einer Schicht nicht vollständig auf- und miteinander verschmelzen, was dann zu schlechteren mechanischen Eigenschaften führt (siehe Unterabschnitt 2.6.1).

### 3.5.4 Alterung

Das nicht aufgeschmolzene Pulver verbleibt für die gesamte Sinterdauer im Bauraum der Maschine und wird erst nach der Beendigung des Bauprozesses vom eigentlichen Bauteil getrennt. Aufgrund der langen Verweildauer bei Temperaturen knapp unterhalb der Schmelztemperatur müssen alle eingesetzten Lasersinterwerkstoffe gegen thermischen Abbau stabilisiert werden [92]. Insbesondere bei Polyamid treten trotz Stabilisation in Abhängigkeit von der Verweildauer Veränderungen im nicht aufgeschmolzenen Pulver auf [44]. Diese Eigenschaftsänderungen schränken die Wiederverwendbarkeit des thermisch belasteten Pulvers ein, da sie die Sintereignung und die mechanischen Eigenschaften der Sinterteile durch Alterungseffekte und Agglomeration (siehe Unterabschnitt 3.6.2) negativ beeinflussen [89].

In der DIN 50035 wird Alterung als Gesamtheit aller im Laufe der Zeit im Material ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge definiert. Alle Alterungsvorgänge sind in der Norm nach inneren und äußeren Alterungsursachen unterteilt [96]. Die Alterung von Kunststoffen ist generell zeit- und temperaturabhängig. Die Zeit bestimmt maßgeblich die Stärke/den Fortschritt der Veränderungen, und die Temperatur beeinflusst die Geschwindigkeit der alterungsbedingten Veränderungen [29]. Einer der chemischen Alterungseffekte, der gemäß DIN 50035 bei Polyamid auftritt und zu einer Veränderung der Molekülgröße führt, ist die Nachpolykondensation. Dieser Vorgang wird auch Festkörperpolykondensation genannt und gehört zu der Gruppe der chemischen Alterungsvorgänge. Er wird durch eine unvollständige Polykondensation hervorgerufen [96]. Seul [97] hat für zwei ungefüllte PA 12-Sinterpulver nachgewiesen, dass das Pulver während des Sinterprozesses durch Nachkondensation chemisch altert. Er zeigt mithilfe seiner Untersuchungen, dass sich die Molmasse des Sinterpulvers durch die thermische Beanspruchung während des Sintervorgangs auf das Zwei- bis Dreifache erhöht, was dann wiederum zu einer Erhöhung der Viskosität führt [97]. Mielicki [29] stellt in seiner Arbeit dar, dass es im nicht versinterten PA 12 Pulver aufgrund von Nachkondensation in der Festphase zu einer Erhöhung des Molekulargewichts kommt. Darüber hinaus beschreiben Mielicki [29] und Becker [98], dass die Polykondensation in der Festphase bei PA 12 gezielt zur Erhöhung der Molmasse eingesetzt werden kann.

Grundsätzlich besitzen Kunststoffschmelzen mit einer geringen Molmasse bzw. kurzen Molekülketten, aufgrund der höheren Beweglichkeit der Makromoleküle, eine geringere Viskosität [48]. Durch fortschreitende Nachpolykondensation kommt es im nicht aufgeschmolzenen Pulver zum Kettenaufbau, der eine Erhöhung der Molmasse bewirkt [48] [97]. Eine höhere Molmasse hat wiederum einen Anstieg der Viskosität der Kunststoffschmelze zur Folge, was negative Auswirkungen auf die Sintereignung des Pulvers hat. Paternosta [45] hat in seinen Untersuchungen gezeigt, dass sich die Viskosität von Sinterwerkstoffen, die nicht gegen thermischen Abbau stabilisiert sind, durch thermische Alterung erheblich stärker verändert als die von modifizierten Pulvern. Die Viskositätszahl von unverändertem Sinterpulver stieg in Versuchen um 135,8 % und die des modifizierten Pulvers um lediglich 4,6 % [45]. Wudy [99] hat in seinen Untersuchungen ebenfalls nachgewiesen, dass die Viskositätszahl von PA 12, das bei hoher

Temperatur und für längere Zeit in einer Stickstoffatmosphäre gelagert wird, um bis zu 65 % ansteigt. Mieliński [29] beschreibt Messungen, in denen zusätzlich der Einfluss der Molmasse und der Heizrate von PA 12 auf die Breite des Schmelzpeaks untersucht wurde. Eine höhere Molmasse und eine hohe Heizrate haben demnach einen breiteren Schmelzpeak zur Folge, was wiederum negativen Einfluss auf die Eignung für den Lasersinterprozess hat, da hierfür ein möglichst schmaler Schmelzpeak vorteilhaft ist. Als Grund für den breiteren Schmelzpeak wird die geringere Beweglichkeit der Polymerketten infolge einer höheren Molmasse bei gleichem monomeren Aufbau genannt [29].

Die zugeführte Wärme kann zusätzlich zur physikalischen Alterung des Kunststoffpulvers durch Nachkristallisation führen. Nachkristallisation bewirkt eine Veränderung des Kristallisationsgrads [29] [96]. Der Kristallisationsgrad wiederum beeinflusst die kristalline Struktur des Sinterpulvers und das damit verbundene Schmelzverhalten [89]. Aufgrund der veränderten Eigenschaften muss bereits verwendetes Material in der Regel vor der Wiederverwendung mit 30 bis 50 Gewichtsprozent Neupulver vermengt werden, um eine gleichbleibende Bauteilqualität zu gewährleisten [44] [93] [100]. Problematisch beim Handling des Sinterpulvers ist, dass es trotz der Einhaltung der vorgeschriebenen Auffrischrate zu Ausschussteilen kommen kann. Durch das mehrmalige Auffrischen des Pulvers wird eine Mischung erzeugt, deren Qualität nur sehr schwer zu definieren ist, da die thermische Belastungsgeschichte der Pulvermischung nicht mehr nachvollziehbar ist [87]. Der Einfluss der Materialcharge auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von lasergesinterten Probestäben bei sonst gleichen Anlageneinstellungen wird in Abschnitt 5.6 analysiert.

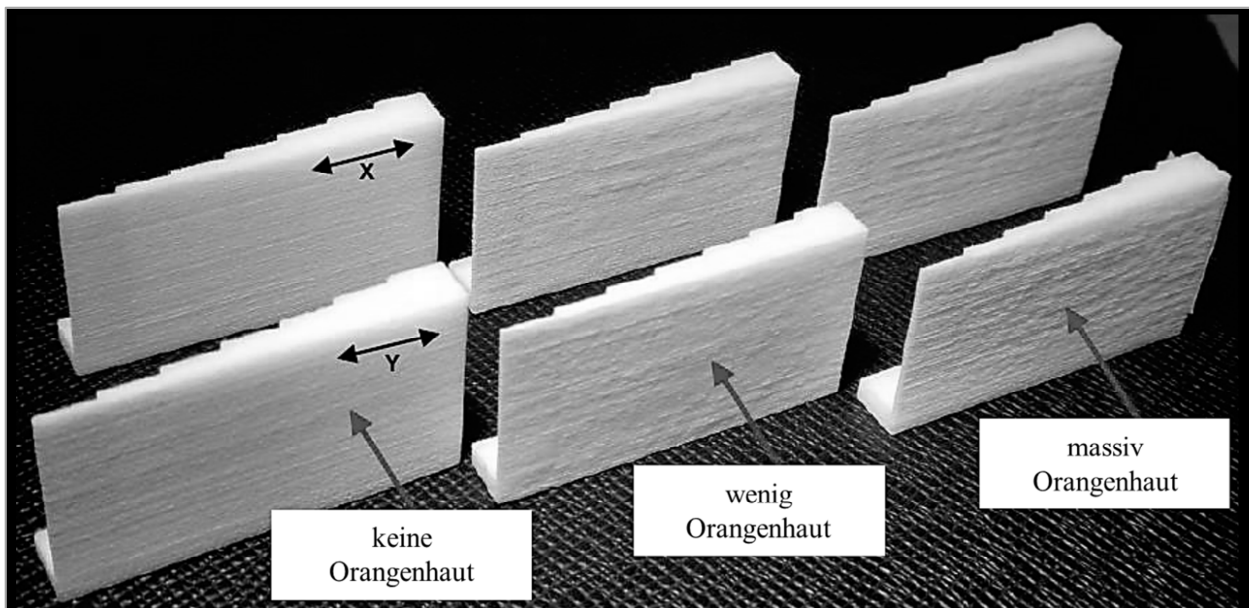


Abbildung 3.20: Lasersinterbauteil mit Orangenhaut [13]

Der Einfluss der Alterung des Pulvers auf die Qualität des Sinterteils wurde in verschiedenen Publikationen untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind allerdings teilweise widersprüchlich. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Alterung des Pulvers zum einen zu einer Verschlechterung der Oberflächenqualität der gesinterten Teile und zum anderen zu einem Abfall der mechanischen Eigenschaften führt, wobei sich die Oberflächeneigenschaften vor den mechanischen Eigenschaften verschlechtern [44]. Der optische Effekt, der an der Oberfläche von Sinterteilen entsteht, die aus überaltertem Pulver hergestellt wurden, wird Orangenhaut genannt. Er tritt immer dann auf, wenn Pulver mit einem zu hohen Alterungszustand eingesetzt wird, da die Schmelzviskosität des Sintermaterials durch die Nachkondensation soweit angestiegen ist, dass die Fließfähigkeit der Schmelze nicht mehr ausreicht, um glatte Oberflä-

chen auszubilden (siehe Abbildung 3.20) [13]. Sauer [86] hat in seinen Untersuchungen an ungefülltem PA 12 gezeigt, dass sich die Zugfestigkeit von lasergesinterten Probestäben durch die mehrfache Wiederverwendung des nicht aufgeschmolzenen Pulvers tendenziell verringert. Er konnte einen annähernd linearen Abfall von 50,6 auf 47,7 MPa feststellen, wobei auch der niedrigste Wert des siebenmal wiederverwendeten Pulvers noch oberhalb der Herstellerangabe liegt. Aus diesem Grund bewertet er den Abfall grundsätzlich als unkritisch [86].

Fiedler [89] hat mithilfe von DSC-Messungen gezeigt, dass sich der Schmelzpeak von PA 12 durch Tempern zu höheren Temperaturen verschiebt. Besonders problematisch ist die Verlagerung des Schmelzpeaks, weil der Peak durch das Auffrischen des gealterten Pulvers mit Neuware lediglich verbreitert, jedoch nicht vollständig zu tieferen Temperaturen verschoben werden kann. Im Sinterprozess kann es also dazu kommen, dass beim Scannen vorrangig das Neupulver aufgeschmolzen wird, während das Altpulver nur unzureichend oder gar nicht aufgeschmolzen wird, da die eingebrachte Energie nicht mehr ausreicht, um die Schmelztemperatur des Altpulvers zu erreichen. Dies hätte eine erhebliche Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften zur Folge [89]. Auch Mielicki [29] beschreibt Messungen, in denen nachgewiesen wird, dass sich die Schmelztemperatur durch Alterung zu höheren Temperaturen verschieben. Der Anstieg der Schmelztemperatur wird von Mielicki [29] durch Nachpolykondensation begründet.

Die Messung der Melt Flow Rate, die sogenannte MFR-Messung, kann zur Bestimmung des Pulverzustands verwendet werden. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass die Schmelzvolumenfließrate (MFR-Wert) mit zunehmender Lagerungsdauer sinkt [44] [87] [101]. Gornet [101] hat mit diesem Verfahren beispielsweise die thermische Alterung von ungefülltem PA 12-Sinterpulver untersucht. Die MFR-Messungen wurden über eine Dauer von 10 min bei 235 °C und mit 2,16 kg Last durchgeführt. Für das Neupulver hat er eine MFR von ca. 52 g/10 min gemessen. Nach zweimaliger Wiederverwendung ca. 32 g/10 min, nach viermaliger ca. 25 g/10 min und nach siebenmaliger sogar nur noch 19 g/10 min. Darüber hinaus hat er in DSC-Messungen den Einfluss der Pulveralterung auf die Schmelztemperatur untersucht. Durch die mehrmalige Wiederverwendung stieg die Schmelztemperatur leicht an. Für das Neupulver lag sie bei ca. 186,2 °C und für siebenmal wiederverwendetes Pulver bei 187,6 °C. Aufgrund der sehr geringen Änderung kann hier jedoch lediglich von einer Tendenz gesprochen werden. Des Weiteren hat Gornet [101] den Einfluss der Pulveralterung auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. Durch die Wiederverwendung stieg die Zugfestigkeit zunächst leicht an, bevor sie bei sechs- und siebenmaliger Aufwärmung relativ stark abfiel. Die gemessene Bruchdehnung stieg durch die mehrfache Wiederverwendung an. Dotchev [87] hat ebenfalls MFR-Messungen an neuem und wiederverwendetem PA 12-Sinterpulver vorgenommen. Die Messungen wurden über eine Dauer von 10 min bei 235 °C und mit 2,16 kg Last durchgeführt und ergaben vergleichbare Ergebnisse wie die bereits erläuterten Untersuchungen von Gornet [101]. Auf Basis seiner Versuchsergebnisse hat Dotchev [87] einen Prozess zur Klassifizierung und zur kontrollierten Wiederverwendung von Altpulver entwickelt.

Auch im Spritzgussprozess wird dem Granulat teilweise recyceltes Material beigemengt, um die Fertigungskosten zu senken. Im Gegensatz zu wiederverwendetem Sinterpulver, bei dem die Melt Flow Rate (MFR) kleiner als bei Neupulver ist, steigt die MFR von recyceltem Spritzgussmaterial an, was auf ein geringeres Molekulargewicht und damit kürzere Molekülketten schließen lässt [87] [101]. Aus diesem Grund wird beim Spritzguss, wenn überhaupt, nur ein sehr kleiner Anteil an recyceltem Material beigemengt, um gute Bauteileigenschaften zu gewährleisten. Der Unterschied bei der Wiederverwendung von Sinterpulver und Recyclinggranulat liegt darin, dass das wiederverwendete Sinterpulver lediglich über einen längeren Zeitraum bei erhöhter Temperatur und Umgebungsdruck gelagert wurde. Recycling-

granulat hingegen wurde im Vorfeld bereits vollständig aufgeschmolzen und mit hohem Druck in eine massive Stahlform gespritzt. Durch den Einspritzvorgang können eventuell vorhandene Füllstoffe beschädigt werden, was wiederum negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat. Beim Lasersintern fällt viel mehr Altmaterial an als beim Spritzgießen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit der Wiederverwendung von Altpulver. Darüber hinaus ist Sinterpulver um ein Vielfaches teurer als Kunststoffgranulat für den Spritzguss (siehe Tabelle 2.3) [87]. In Abschnitt 5.6 wird untersucht, inwieweit die mechanischen Eigenschaften von Sinterproben streuen, die in unterschiedlichen Chargen gefertigt werden.

### 3.5.5 Aktuell verwendete Sinterpolyamide

Sowohl beim SLS als auch beim SG werden thermoplastische Kunststoffe verarbeitet. Durch Spritzgießen können nahezu alle thermoplastischen Kunststoffe verarbeitet werden, sodass eine sehr große Vielzahl von Materialien zur Verfügung steht. Lediglich einige wenige Thermoplaste, die bei Verarbeitungstemperatur ein sehr schlechtes Fließvermögen besitzen, sind nicht geeignet [79]. Die Materialvielfalt der kommerziell erhältlichen Sinterwerkstoffe ist wesentlich eingeschränkter, da die Verarbeitung durch Lasersintern, wie zuvor erläutert, sehr spezifische Anforderungen an die Eigenschaften der Kunststoffmaterialien stellt. Aktuell werden hauptsächlich teilkristalline Werkstoffe verarbeitet [13]. Grundsätzlich sind auch amorphe Thermoplaste wie Polystyrol (PS), Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polycarbonat (PC) geeignet, allerdings weisen die fertigen Bauteile eine hohe Porosität und schlechte mechanischen Eigenschaften auf [32] [92]. Der Grund hierfür ist, dass amorphe Werkstoffe oftmals noch weit oberhalb ihrer Glasübergangstemperatur eine sehr hohe Nullviskosität besitzen, was dazu führt, dass die aufgeschmolzenen Pulverkörner im Sinterprozess nur unzureichend zusammenfließen (siehe Unterabschnitt 3.5.2) [13].

Der am häufigsten verwendete Grundwerkstoff für das SLS ist teilkristallines PA 12. Der Marktanteil liegt je nach Quelle der Schätzung zwischen 80 und 95 % [4] [22] [44] [93] [95] [102] [103]. Für den großen Marktanteil von PA 12-Sinterpulver gibt es verschiedene Gründe. Der Hauptgrund sind die thermischen Eigenschaften, insbesondere die im Vergleich zu anderen Thermoplasten große Differenz zwischen Schmelz- und Kristallisationstemperatur ist vorteilhaft für den Sinterprozess. Sie gewährleistet ein ausreichend großes Prozessfenster für reproduzierbare Fertigungsbedingungen. Des Weiteren ist die hohe Schmelzenthalpie von PA 12 vorteilhaft für den Sinterprozess [32] [42] [50]. Ehrenstein [53] gibt für Standard PA 12 eine Schmelztemperatur von 171 °C und eine Kristallisationstemperatur von 144 °C an. Scholten [50] beschreibt die Ergebnisse von DSC-Messungen an Sinterpulvern aus PA 12, die mit einer Aufheiz- und Abkühlrate von 20 K/min durchgeführt wurden. In seinen Analysen hat er je nach Pulverhersteller Kristallisationstemperatur von 141 bis 143 °C und Schmelztemperaturen von 176 bis 187 °C ermittelt. Die minimal gemessene Temperaturdifferenz für PA 12-Pulver liegt bei 33 °C und die maximale bei 46 °C. Die gemessene Schmelzenthalpie liegt zwischen 71 und 112 J/g. Für PA 11 hingegen hat er lediglich eine Temperaturdifferenz von 29 °C und eine Schmelzenthalpie von 87 J/g gemessen [50]. Schmid [13] hat in DSC-Messungen den Schmelz- und Kristallisationspunkt von Standard-PA 12 (Spritzgussmaterial) und PA 12-Sinterpolyamiden miteinander verglichen. Seine Messungen ergaben, dass zwei der drei Sinterpolyamide beim ersten Aufheizen eine um 6 bis 7 °C höhere Schmelztemperatur besitzen als das Spritzgussmaterial. Die Schmelzenthalpie der drei Sinterpolyamide ist bei der ersten Aufheizung etwa doppelt so hoch, wie die des Standard-PA 12. Die Ergebnisse von Schmid zeigen, dass die Sintermaterialien speziell an die Anforderungen des Sinterprozesses angepasst sind, um eine stabile Prozessführung zu ermöglichen [13]. Bei der Wahl der Prozesstemperaturen muss immer berücksichtigt werden,

dass nicht der gesamte Temperaturbereich zwischen den Peak-Temperaturen als Prozessfenster zur Verfügung steht, sondern nur die Differenz zwischen den Onset-Temperaturen (siehe Unterabschnitt 3.4.4).

Eine weitere thermische Eigenschaft von PA 12, die für das Lasersintern vorteilhaft ist, besteht in der im Vergleich zu anderen Polyamiden geringen Schmelztemperatur. Im Sinterprozess wird der gesamte Bauraum der Anlage auf eine Temperatur knapp unterhalb der Schmelztemperatur vorgewärmt. Je geringer die Vorwärmtemperatur, desto geringer ist die zur Aufheizung der Maschine benötigte Energie und Zeit. Darüber hinaus stellt eine geringe Vorwärmtemperatur niedrigere Anforderungen an die thermischen Eigenschaften der Sinteranlage. Insbesondere die Isolation des Bauraums wird mit steigender Vorwärmtemperatur immer aufwendiger. Für PA 12 sind Prozesstemperaturen von ca. 200 °C ausreichend, für PA 66 hingegen wären ca. 270 °C notwendig. Auch bei der Abkühlung des Pulverkuchens auf Raumtemperatur wirkt sich die niedrige Prozesstemperatur von PA 12 positiv aus. Je geringer die Differenz zwischen Prozess- und Raumtemperatur, desto geringer ist die Abkühlgeschwindigkeit [95].

Auch die im Vergleich zu anderen Polyamiden sehr geringe Wasseraufnahme von PA 12 ist ein Grund für die Verwendung als Sinterwerkstoff [32]. Ungefülltes PA 12 nimmt bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit lediglich 0,7 % Wasser auf. Die Feuchtigkeitsaufnahme von gefülltem PA 12 bei 23 °C und 50 % r.F. liegt je nach Füllgrad zwischen 0,4 und 0,6 %. PA 6 hingegen absorbiert bei gleichen Lagerbedingungen ca. 3 % Wasser [8] [104] [105]. Sinterpulver hat im Vergleich zu Spritzgussgranulat eine viel größere Oberfläche und nimmt deswegen schneller Wasser auf. Bei Sinterpulver aus PA 6 oder PA 66 wäre eine zusätzliche Trocknung notwendig, da das Pulver im Verarbeitungsprozess nur einen sehr geringen Wassergehalt aufweisen darf. Enthaltenes Wasser verdampft im Sinterprozess und führt zu Poren im späteren Bauteil. PA 12 nimmt generell sehr wenig Feuchtigkeit auf, deshalb wird die Feuchtigkeitsaufnahme beim Pulverhandling in der Regel toleriert und das Pulver ohne vorgelagerte Trocknung verarbeitet. Ein weiterer Vorteil, der durch die geringe Wasseraufnahme entsteht, ist die hohe Dimensionsstabilität von Kunststoffbauteilen aus PA 12 im Vergleich zu Teilen aus anderen Polyamiden [95]. Des Weiteren sind die Riesel- und Fließfähigkeit des Pulvers sowie die niedrige Schmelzviskosität von PA 12 besonders gut für den Lasersinterprozess geeignet [42].

Die teilkristallinen Werkstoffe Polyoxymethylen (POM), Polypropylen (PP) und Polyetheretherketon (PEEK) werden ebenfalls im Lasersinterverfahren verarbeitet [22] [92] [93]. Insbesondere die Verarbeitung von PEEK stellt jedoch sehr hohe Anforderungen an die thermischen Eigenschaften einer Sinteranlage, da die Schmelztemperatur von PEEK ca. 334 °C beträgt. Für den Lasersinterprozess wird also eine Bauraumtemperatur in vergleichbarer Höhe benötigt. Zur Verarbeitung dieses Werkstoffs entwickelte die Firma EOS Hochtemperaturmaschinen, die eine Bauraumtemperatur bis 385 °C ermöglichen [32] [106]. Schmid schätzt den Marktanteil von PEEK aktuell allerdings auf < 1 % [13]. Zusätzlich zu den ungefüllten Materialien sind vereinzelt glas- und kohlenstoffgefüllte Sinterpulver erhältlich [22]. Bauteile aus gefüllten Materialien weisen in der Regel eine höhere Steifigkeit auf [93]. Glaskugelgefüllte Sinterwerkstoffe werden glasgefüllt genannt und üblicherweise mit GF abgekürzt, obwohl die analoge Bezeichnung bei Spritzgießwerkstoffen glasfaserverstärkte Materialien meint. Dies kann unter Umständen zu Verwechslungen führen. Aus diesem Grund wird in diesem Beitrag die Abkürzung GK für die Kennzeichnung des glaskugelgefüllten Materials verwendet. Die verwendeten Kugeln haben einen Durchmesser von 50 bis 60 µm (siehe auch Abschnitt 5.1). Sie wirken dehnungsbehindernd und erhöhen die Steifigkeit. Durch lokale Kugelanhäufungen können sich kleine Hohlräume im Material bilden, die die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen [4]. Abbildung 3.21 zeigt eine Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme (REM-Aufnahme) von glasgefülltem Polyamid. Es ist zu erkennen, dass zwischen einigen Kugeln kein

Matrixmaterial vorhanden ist. Derartige Regionen sind als Fehlstellen anzusehen, da sie keine Kräfte übertragen können. Zu gefüllten Materialien liegen nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen vor. Dies gilt auch für das glaskugelgefüllte Polyamid 12 von der Firma EOS, das im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird. Auch der Einfluss der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Glaskugeln auf die Verteilung der Kugeln sowie die mechanischen Eigenschaften des Sinterbauteils ist bisher nicht bekannt. Der Einfluss der Glaskugeln auf die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem PA 12 GK wird in Abschnitt 5.1 charakterisiert.

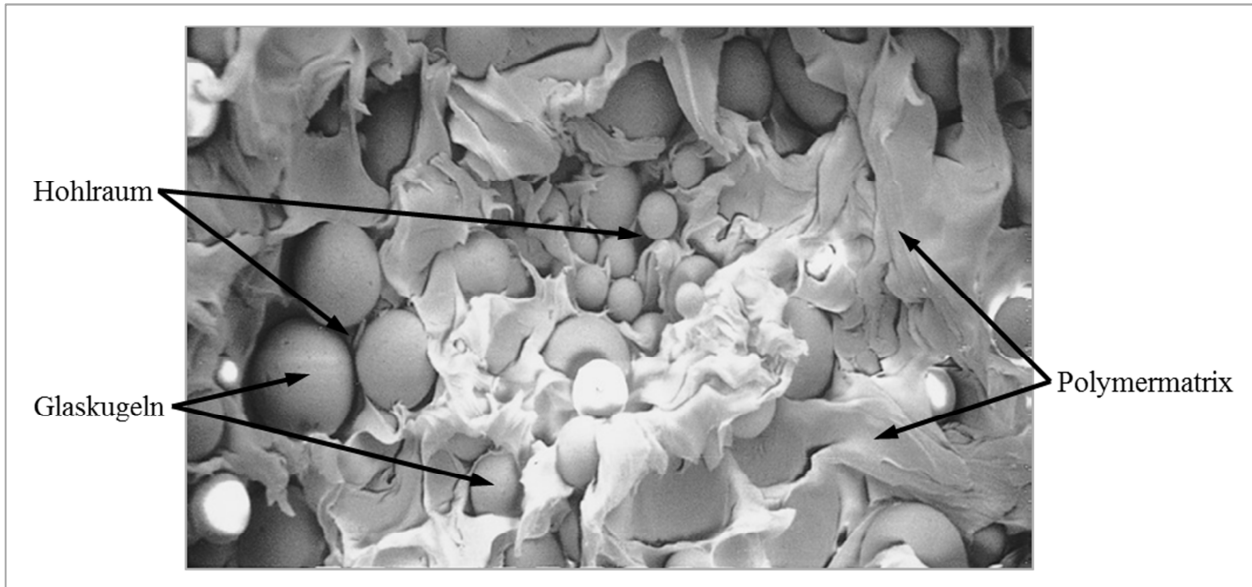


Abbildung 3.21: REM-Aufnahme von glasgefülltem PA 12 GK [4]

### 3.6 Pulverspezifische Eigenschaften

In Abbildung 3.22 sind alle Einflussgrößen der Hauptgruppe Bauteile zusammengefasst dargestellt. Die Erläuterung der einzelnen Größen erfolgt in den Unterabschnitten 3.6.1 und 3.6.2.

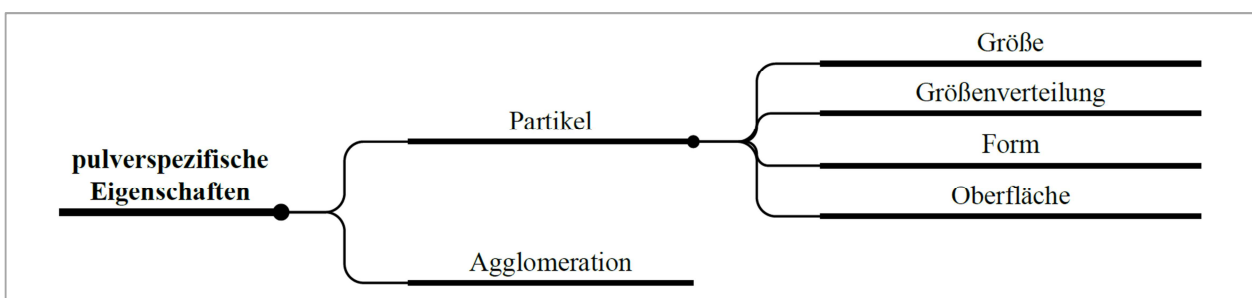


Abbildung 3.22: Parameter der Hauptgruppe pulverspezifische Eigenschaften

#### 3.6.1 Partikel

Größe, Form und Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Pulverpartikel haben großen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Sinterpulvers im Lasersinterprozess. Die Grundvoraussetzung hinsichtlich der Größe der einzelnen Pulverkörner ist, dass die größten Pulverkörner kleiner als die Schichtdicke (siehe Unterabschnitt 3.4.2) sind, da beim Pulverauftrag sonst keine streifenfreie Pulveroberfläche erzeugt werden kann [13]. Handelsübliche Sinterpulver bestehen aus sphärischen Partikeln mit einer mittleren Partikelgröße von 50 bis 60  $\mu\text{m}$  und einer Partikelgrößenverteilung zwischen 20 und 80  $\mu\text{m}$  [22] [86] [103]. Die Form der Pulverpartikel beeinflusst die Rieselfähigkeit des Pulvers [16]. Aufgrund der überwiegend

runden Körner zeichnen sich Sinterpulver durch eine gute Riesel- und Fließfähigkeit aus. Diese Eigenschaft wird zum Erreichen von glatten Schichten mit einer hohen Schüttgutdichte benötigt. Je höher die Schüttgutdichte des Pulvers, desto höher die Dichte, Festigkeit und Maßhaltigkeit des lasergesinterten Bauteils. Allgemein führen hohe Schüttgutdichten zu Bauteilen mit geringer Porosität. Eine zu hohe Schüttgutdichte kann jedoch die Rieselfähigkeit des Pulvers verringern, was dann wiederum negativen Einfluss auf die Qualität des späteren Bauteils hat [22] [43] [86] [92] [93].

Die Anzahl der Kontaktpunkte zwischen den einzelnen Partikeln ist bei kleinen Körnern höher als bei größeren, sodass sie sich schneller oder bereits bei geringerer Temperatur verbinden [29]. Deshalb hat die Partikelgrößenverteilung des Pulvers direkt Einfluss auf das Schmelzverhalten. In der Regel wird nur der mittlere Durchmesser der Pulverkörner vom Pulverhersteller angegeben, es befinden sich allerdings auch kleinere Partikel im Pulver. Dies kann bei zu geringer Strahlenergie dazu führen, dass vorrangig die kleineren Partikel aufschmelzen und die größeren nicht. Auf diese Weise entsteht ein inhomogenes Materialgefüge, was Baufehler und/oder eine verringerte Bauteilfestigkeit zur Folge hat [16] [22] [92]. Die Wiederverwendung von Sinterpulver hat ebenfalls Einfluss auf die Korngrößenverteilung des Pulvers. Dieser Effekt wird nachfolgend genauer erläutert.

### 3.6.2 Agglomeration von Sinterpulver

Im Idealfall ist das Pulver nach Beendigung des Sinterprozesses nicht agglomert und kann allein durch den Einfluss der Schwerkraft vom Bauteil getrennt werden [92]. Sauer [86] hat jedoch gezeigt, dass eine gewisse Agglomeration nicht ausbleibt. Durch die mehrfache thermische Belastung verbinden sich die kleineren Partikel aufgrund ihrer geringen Masse mit den größeren. In seinen Untersuchungen konnte er einen Anstieg der mittleren Korngröße von ca. 50  $\mu\text{m}$  hin zu ca. 90  $\mu\text{m}$  feststellen. Dieser Effekt ist in Abbildung 3.23 sehr gut zu erkennen. Bild a) der Abbildung zeigt ein Korn eines neuen Sinterpulvers und Bild b) ein Pulverkorn nach der siebten Wiederverwendung des Pulvers. Es ist gut zu erkennen, dass sich kleinere Partikel an ein größeres Korn angelagert haben. Der Anstieg der durchschnittlichen Korngröße und die veränderte Form der Pulverpartikel haben negativen Einfluss auf die Schüttgutdichte des Pulvers, die Porosität, die Maßhaltigkeit, die mechanischen und optischen Eigenschaften von Lasersinterteilen.

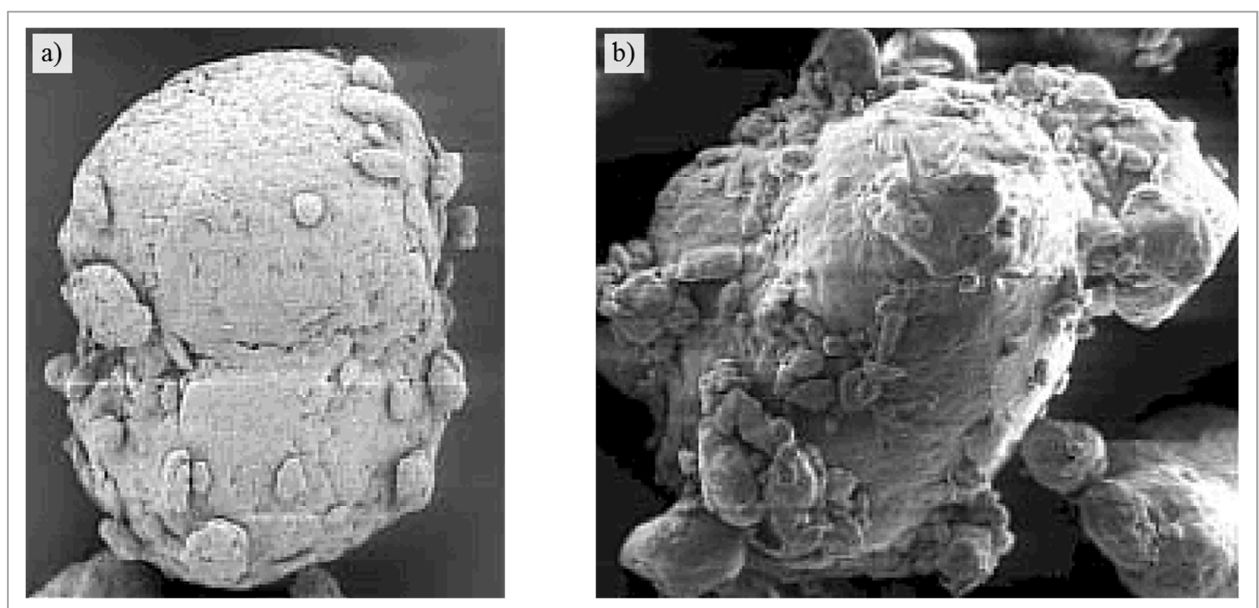


Abbildung 3.23: Bild a) Pulverkorn eines neuen Sinterpulvers; Bild b) Pulverkorn nach siebenmaliger Wiederverwendung [86]



## 4 Charakterisierung der Randbedingungen

In diesem Kapitel werden die Fertigungsparameter und die Randbedingungen der durchgeführten Werkstoffprüfungen erläutert. Dieser Schritt ist notwendig, um die in dieser Arbeit dargestellte Systematik und die Diskussion der Versuchsergebnisse nachvollziehen zu können. Für eine systematische Vorgehensweise sind klar definierte Randbedingungen sowohl bei der Herstellung von Probekörpern und Bauteilen als auch bei der Durchführung von Werkstoff- und Bauteilprüfungen zwingend erforderlich. Bei der Untersuchung von Polymerwerkstoffen müssen die jeweiligen Randbedingungen exakt eingehalten und sorgfältig dokumentiert werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Der Grund hierfür ist die bei dieser Werkstoffgruppe besonders stark ausgeprägte Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von den Fertigungsparametern (siehe Abschnitt 4.1), der Ausrichtung des Teils bei der Herstellung (siehe Abschnitt 4.3), den geometrischen Abmessungen des Prüfkörpers, der Vorbehandlung (siehe Abschnitt 4.4) und den Prüfbedingungen (siehe Abschnitt 4.5), mit denen sie ermittelt wurden.

### 4.1 Herstellungsprozess

In dieser Arbeit werden die quantitativen Zusammenhänge zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK ausführlich analysiert und diskutiert. Mithilfe eines wissenschaftlichen Ansatzes wird dargestellt, wie lasergesinterte Prototypen im Entwicklungsprozess eines Spritzgießbauteils zur Verifikation von Simulationsergebnissen und zur quantitativen Absicherung von Bauteilkonzepten eingesetzt werden können. Deshalb liegt der Fokus dieser Arbeit auf dem Vergleich der Eigenschaften von Prototypen bzw. Bauteilen, die durch die Verwendung von optimierten und vielfach bewährten Fertigungsparametern hergestellt werden und nicht auf der Untersuchung des Einflusses von einzelnen Fertigungsparametern auf die mechanischen Eigenschaften von gesinterten und spritzgegossenen Bauteilen. Die Voraussetzung für die Durchführung des Eigenschaftsvergleichs sind stabile und sorgfältig eingestellte Fertigungsprozesse, da nur auf diese Weise die optimalen Werkstoffeigenschaften erreicht werden können. Aus diesem Grund werden gesinterte und spritzgegossene Prüfkörper sowie Bauteile untersucht, die gemäß den Vorgaben des Materialherstellers gefertigt werden.

Tabelle 4.1: Prozessparameter Lasersintern und Spritzguss

Parameter Selektives Lasersintern				Parameter Spritzgießen	
Sinterexperte 1 (EXP_1)		Sinterexperte 2 (EXP_2)		Technikum Ostfalia	
Pulverhersteller	EOS GmbH	Pulverhersteller	EOS GmbH	Granulathersteller	EMS-CHEMIE AG
verwendete Pulver	PA 2200	verwendete Pulver	PA 3200 GF	verwendete Granulate	Grilamid L 20 G
	PA 3200 GF *				Grilamid LKN 3H
					Grilamid LKN 5H
Maschinenhersteller	3D Systems	Maschinenhersteller	EOS GmbH	Maschinenhersteller	Arburg GmbH & Co. KG
Maschine	Vanguard HIQ+HS	Maschine	P 385	Maschine	420C Allrounder 1000-250
Laserleistung	34 W	Laserleistung	40 W	Materialtrocknung	10 h bei 80 °C
Spurversatz	0,25 mm		0,28 mm	Temperaturen	gemäß Datenblatt
Schichtdicke	0,1 mm	Schichtdicke	0,12 mm	Nachdruck	gemäß Datenblatt
Scan-Strategie	Kreuz-Strategie	Scan-Strategie	Kreuz-Strategie	Staudruck	gemäß Datenblatt
Altpulver	60 %	Altpulver	43 %	Schneckenendrehzahl	gemäß Datenblatt
Neupulver	40 %	Neupulver	57 %		

\* EOS nennt das Pulver PA 3200 GF; die Abkürzung GF steht in diesem Zusammenhang für glasgefüllt

Alle benötigten Sinterteile werden von erfahrenen Industriepartnern gefertigt, die sich auf das sogenannte Additive Manufacturing spezialisiert haben und langjährige Erfahrung im Bereich Selektives Lasersintern besitzen. Auf diese Weise wird das Know-how von externen Spezialisten genutzt, um optimierte und

vielfach erprobte Parameter (siehe Tabelle 4.1) für den Lasersinterprozess zu verwenden. Der Einsatz von optimierten Parametern zur Herstellung von Lasersinterteilen ist die Grundvoraussetzung für einen stabilen Lasersinterprozess. Einzig Probekörper und Bauteile, die mit optimierten Parametern und in einem stabilen Fertigungsprozess hergestellt werden, sind für die systematische Charakterisierung der Materialeigenschaften in Kapitel 5 und die Analyse des quantitativen Zusammenhangs in Kapitel 7 geeignet. Auch die zuverlässige Abbildung der mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten Bauteilen mithilfe von Strukturanalysen (siehe Kapitel 6) ist nur dann möglich, wenn die Bauteile in einem stabilen Prozess hergestellt werden. In der Praxis ist es in der Regel ebenfalls so, dass die im Entwicklungsprozess eingesetzten lasergesinterten Prototypen von externen Sinterexperten bezogen werden. Nur wenige Firmen besitzen intern sowohl das notwendige Fachwissen im Bereich Bauteildimensionierung als auch die notwendigen Maschinen und Anlagen sowie das erforderliche Know-how zur Fertigung von Prototypen und Serienteilen.

Zur Analyse der Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften werden lasergesinterte Probekörper und Prototypen aus unterschiedlichen Chargen und von zwei verschiedenen Sinterexperten untersucht. Zur Unterscheidung der Sinterexperten werden nachfolgend die Abkürzungen EXP\_1 (Sinterexperte 1) und EXP\_2 (Sinterexperte 2) verwendet. Alle Sinterteile von einem Experten werden mit den gleichen Einstellungen und auf derselben Anlage gefertigt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Herstellung der spritzgegossenen Proben und Bauteile erfolgt gemäß den Vorgaben in den Datenblättern des Werkstofflieferanten (siehe Tabelle 4.1).

## 4.2 Werkstoffe

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die mechanischen Eigenschaften von ungefülltem und glaskugelfülltem Polyamid 12 untersucht. Als Sintermaterial werden Pulver der Firma EOS und für den Spritzguss Granulate der Firma EMS-Chemie verwendet. Die genauen Materialbezeichnungen sind in Tabelle 4.2 angegeben.

Tabelle 4.2: Verwendete Materialien zur Untersuchung des Einflusses der Glaskugeln

Material-bezeichnung	Polymer-bezeichnung	Lieferant	Glaskugel-massenanteil	Verarbeitung	Quelle Datenblatt
Grilamid L 20 G	PA 12	EMS-Chemie	-	SG	[107] [108]
Grilamid LKN 3H	PA 12 GK 30	EMS-Chemie	30 %	SG	[109] [110]
Grilamid LKN 5H	PA 12 GK 50	EMS-Chemie	50 %	SG	[111] [112]
PA 2200	PA 12	EOS	-	SLS	[11]
PA 3200 GF	PA 12 GK 540	EOS	40 % *	SLS	[12]

\* Glaskugelanteil gemäß eigener Messung (siehe Abbildung 4.2) und [113]

### 4.2.1 Polyamid

Polyamide sind teilkristalline, polare und thermoplastische Polymere [8]. Die Methylengruppen ( $-\text{CH}_2-$ ) von Polyamiden sind durch Carbonsäureamidgruppen ( $-\text{CONH}-$ ), nachfolgend kurz Amidgruppen genannt, miteinander verknüpft. Hinsichtlich des strukturellen Aufbaus von aliphatischen Polyamiden werden zwei Typen unterschieden (siehe Tabelle 4.3) [60]. Polyamide beider Typen werden Homopolyamide genannt. Die Kennzeichnung erfolgt durch die Angabe aller Kohlenstoffatome (C-Atome), die in den Ausgangsmonomeren enthalten sind [53] [54].

Tabelle 4.3: Einteilung der Polyamide in zwei Gruppen aufgrund der Anzahl der Ausgangsstoffe [54]

Aminosäuretypen	Diamin-Dicarbonsäuretypen
AB-Typ	AABB-Typen
ein Ausgangsstoff	zwei Ausgangsstoffe
z. B. PA 6, PA 11, PA 12	z. B. PA 66, PA 610, PA 1212
$\left[ \begin{array}{c} \text{H} \\   \\ -\text{N}-(\text{CH}_2)_x-\text{C}- \\    \\ \text{O} \end{array} \right]_n$ <div style="display: flex; justify-content: flex-end; margin-top: 10px;"> <div>PA 6: x = 5</div> <div>PA 11: x = 10</div> <div>PA 12: x = 11</div> </div>	$\left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \quad \text{H} \\   \quad \quad   \\ -\text{N}-(\text{CH}_2)_x-\text{N}-\text{C}-(\text{CH}_2)_y-\text{C}- \\    \quad \quad    \\ \text{O} \quad \quad \text{O} \end{array} \right]_n$ <div style="display: flex; justify-content: flex-end; margin-top: 10px;"> <div>PA 66: x = 6, y = 4</div> <div>PA 610: x = 6, y = 8</div> <div>PA 1212: x = 12, y = 10</div> </div>

Durch den stark polaren Charakter der Amidgruppe kommt es zur Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen benachbarten Molekülketten. Die Wasserstoffbrückenbindungen haben zum einen positiven Einfluss auf die mechanische Belastbarkeit des Werkstoffs, da ihre Bindungsenergie größer ist, als die anderer Nebenvaleanzbindungen (siehe Tabelle 2.4), zum anderen begünstigen Wasserstoffbrückenbindungen die in Unterabschnitt 2.5.2 ausführlich diskutierte Wasseraufnahme. Aus den genannten Gründen beeinflusst die Anzahl an Methylengruppen zwischen den Amidgruppen die mechanischen Eigenschaften von Polyamiden maßgeblich. Mit steigender Anzahl nimmt die Zahl der Wasserstoffbrückenbindungen ab, wodurch sich die mechanischen Eigenschaften verringern. PA 12 hat demnach aufgrund der Konstitution der Monomere eine geringere Festigkeit und eine niedrigere Schmelztemperatur als PA 6. Auch die für Polyamide charakteristische Wasseraufnahme nimmt mit steigender Anzahl von Methylengruppen ab [8]. Die chemische Zusammensetzung von Polyamiden wird häufig auch durch die Angabe des Methylen/Carbonamid-Atomgruppenverhältnisses beschrieben. Beispielsweise liegt das Verhältnis für PA 12 bei 11/1 und für PA 6 bei 5/1 [98].

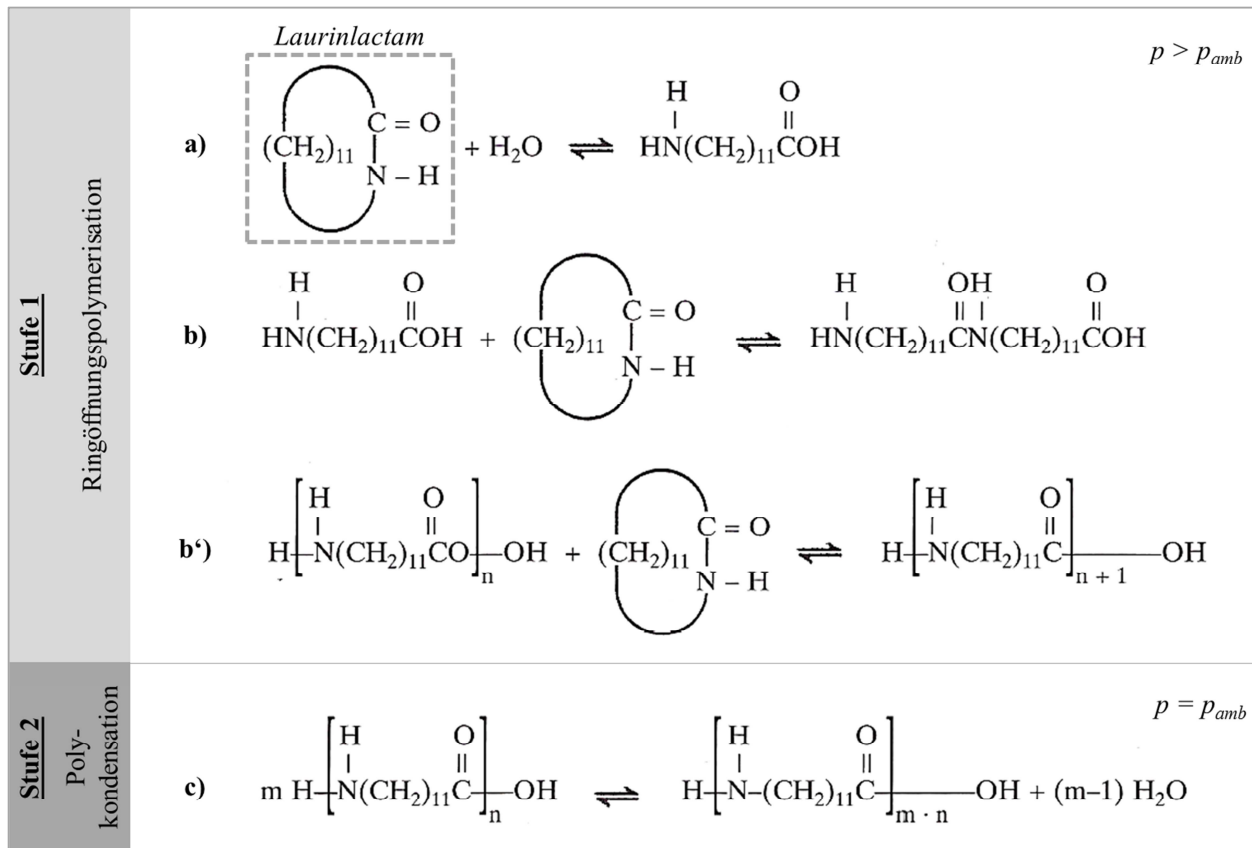


Abbildung 4.1: Reaktionsschema zur Synthese von PA 12 aus Laurinlactam gemäß [98]

Butadien, das durch unterschiedliche Verfahren zu Laurinlactam umgesetzt wird, bildet die petrochemische Rohstoffbasis für PA 12. Zur Herstellung von PA 12 wird das Laurinlactam hydrolytisch polymerisiert. Die hydrolytische Polymerisation ist ein zweistufiger Prozess (siehe Abbildung 4.1). Stufe 1 ist eine Ringöffnungspolymerisation, die in Gegenwart von Wasser und unter Druck stattfindet (Reaktion a), b) und b') in Abbildung 4.1). Stufe 2 ist eine Polykondensation bei Umgebungsdruck ( $p_{amb}$ ). Sie ist entscheidend für die Einstellung des Molekulargewichts des entstehenden Polyamids (Reaktion c) in Abbildung 4.1) [98].

#### 4.2.2 Verfügbare Materialdatenblätter

Werkstoffkennwerte von Thermoplasten, die in den Datenblättern der Materialhersteller veröffentlicht werden, wurden mithilfe von genormten Probekörpern und unter definierten Prüfbedingungen ermittelt. Sofern die verwendete Prüfnorm und der Typ des Probestabs angegeben sind, können die genauen Abmessungen des Probekörpers nachvollzogen werden. Die Norm DIN EN ISO 527 beispielsweise beschreibt die Durchführung von Versuchen zur Ermittlung der Zugeigenschaften von Kunststoffen. In Teil 2 der Norm sind die Abmessungen der zu verwendenden Probekörper angegeben. Der am häufigsten eingesetzte Probestab ist der Probekörper vom Typ 1A mit einer Dicke von 4 mm. Diese Form wird für direkt geformte Probestäbe verwendet. Reale Spritzgießbauteile besitzen in den meisten Fällen Wanddicken von 2 mm oder deutlich darunter. Diese Abweichung von den Normbedingungen kann sich merklich in den real vorliegenden Werkstoffkennwerten niederschlagen [114]. Aus diesem Grund wird der Einfluss der Probekörperdicke in Abschnitt 5.5 sowohl für spritzgegossenes als auch für lasergesintertes PA 12 diskutiert.

In Abschnitt 2.5 wurde bereits erläutert, dass die mechanischen Eigenschaften von Polyamiden durch viele Faktoren beeinflusst werden. Da die Kennwerte in den Datenblättern der Materialhersteller unter ganz bestimmten Randbedingungen ermittelt wurden und nur für diesen einen Belastungszustand zutreffend sind, können sie bei der Bauteildimensionierung lediglich als Richtwert verwendet werden. Darüber hinaus muss immer überprüft werden, ob im Datenblatt die Bedingungen angegeben sind, mit denen die Probestäbe gefertigt und die Prüfungen durchgeführt wurden. Einzig Kennwerte, die unter gleichen Randbedingungen ermittelt wurden, sind direkt miteinander vergleichbar. Werkstoffkennwerte ohne Angabe der Randbedingungen sind für die Bauteilauslegung nahezu wertlos. Materialdatenblätter repräsentieren demnach primär nicht die Eigenschaften eines bestimmten Kunststoffs, sondern die Eigenschaften eines Probekörpers, der aus diesem Material hergestellt wurde und der sich in einem verarbeitungsbedingten Zustand befindet. Zu einer sachgerechten Kennwertdokumentation gehören deshalb Angaben zum Zustand des Probekörpers und zu den gewählten Prüfbedingungen. Für die Auslegung von realen Formteilen eignen sich Datenblattkennwerte nur bedingt, da sich Probestab und reales Bauteil hinsichtlich Wanddicke, Herstellungsbedingungen und Belastungsverlauf in der Regel unterscheiden [114].

#### Sintermaterial

Die Firma EOS stellt für die verwendeten Sintermaterialien Datenblätter mit grundlegenden Kennwerten zur Verfügung (siehe Tabelle 4.2). Die Datenblätter enthalten allerdings bereits den Hinweis, dass die bereitgestellten Werte keine Grundlage für eine Bauteilauslegung bilden können und dass mit dem Datenblatt keine bestimmten Eigenschaften oder die Eignung des Produkts für spezifische Anwendungen vereinbart bzw. garantiert werden [12]. Des Weiteren ist die Dokumentation der Kennwerte in den

Datenblättern unvollständig. Es fehlen Hinweise zur Form der Probestäbe, zur Vorbehandlung der Proben und zu den Prüfgeschwindigkeiten. Insbesondere die Angabe des Konditionierungszustands ist bei Polyamiden von großer Bedeutung, da deren Eigenschaften stark vom Feuchtigkeitsgehalt beeinflusst werden (siehe Unterabschnitt 2.5.2 auf Seite 21). Für lasergesintertes PA 12 liegen bisher keine wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse zur Quantifizierung der absoluten Beträge der Änderung der mechanischen Eigenschaften aufgrund von Wasseraufnahme vor [22]. Aus den genannten Gründen sind die Datenblätter des Pulverherstellers wenig aussagekräftig. Da der Gewichtsanteil der Glaskugel des Sintermaterials ebenfalls nicht angegeben ist, wird er mithilfe einer thermogravimetrischen Analyse (TGA) ermittelt. Bei einer derartigen Analyse wird die Massenänderung einer Probe in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt. Die Messkurve in Abbildung 4.2 zeigt einen Restmasseanteil von 39,92 % bei ca. 645 °C. Dieser Restmasseanteil entspricht dem Glaskugelanteil des Sintermaterials. Die Firma 1zu1 Prototypen [113] gibt auf ihrer Homepage ebenfalls einen Glaskugel-Gewichtsanteil von 40 % für das glaskugelgefüllte Sintermaterial von EOS an.

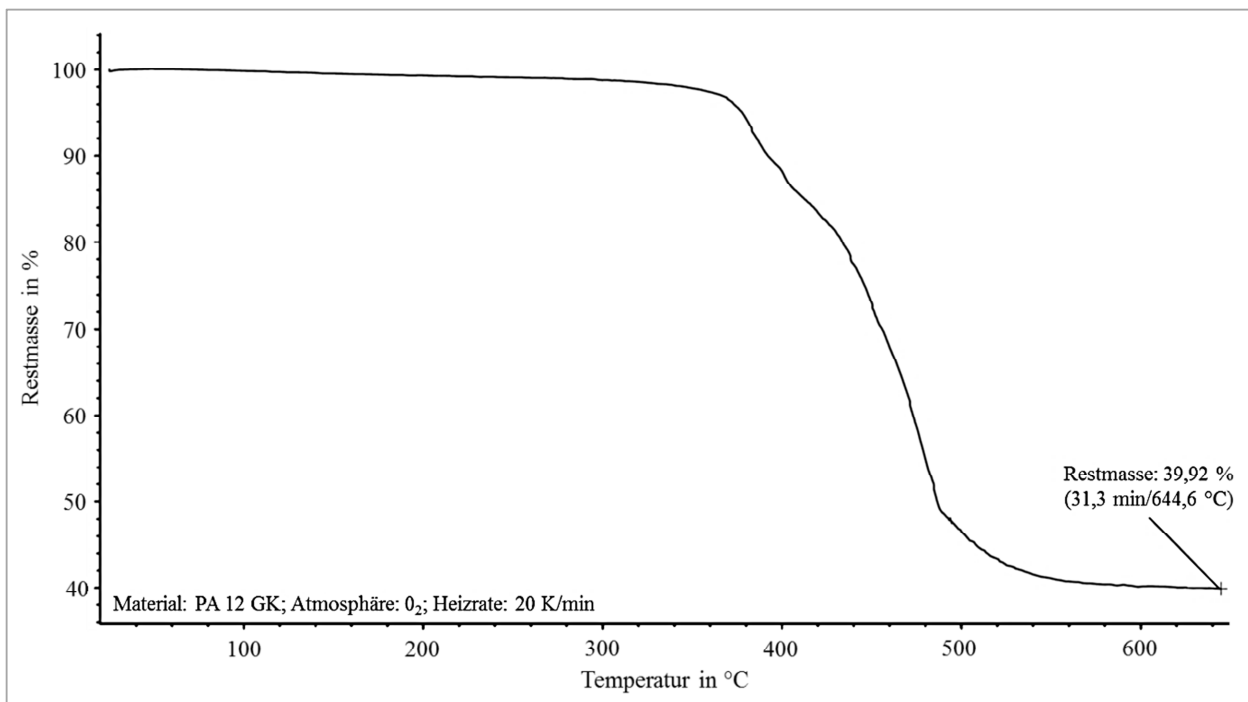


Abbildung 4.2: Messkurve einer TGA des glaskugelgefüllten PA 12-Sinterwerkstoffs

Positiv an den bereitgestellten Datenblättern des Materialherstellers ist, dass sie bereits einen Hinweis darauf enthalten, dass die Eigenschaften des gesinterten Bauteils aufgrund der zeilen- bzw. schichtweisen Bauteilherstellung (siehe Abschnitt 2.3.1) anisotrop sind (siehe Unterabschnitt 5.2.1). Für bestimmte Werkstoffkennwerte sind deshalb Angaben für die drei Raumrichtungen vorhanden. Die Achsausrichtung orientiert sich an den Raumkoordinaten der Maschine (siehe Unterabschnitt 3.3.1). Eine detaillierte Angabe zur Lage der Oberfläche des Probestabes im Sinterprozess (siehe Abschnitt 4.3) fehlt jedoch. Anhand der bereitgestellten Werte ist zu sehen, dass die Festigkeitseigenschaften des Sintermaterials in Bau- richtung geringer sind als senkrecht dazu. Die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften des Sintermaterials muss sowohl bei der Werkstoffcharakterisierung (siehe Kapitel 5) als auch bei der Durchführung von Struktursimulationen (siehe Kapitel 6) sowie der Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs (siehe Kapitel 7) berücksichtigt werden.

Insgesamt ist die Dokumentation der Kennwerte des Sintermaterials für die Verwendung zur Bauteildimensionierung nicht ausreichend. Darüber hinaus fehlen Spannungs-Dehnungs-Diagramme, die zur

Erstellung eines Materialmodells für die Struktursimulation zwingend benötigt werden. Deshalb werden die mechanischen Eigenschaften der ausgewählten Sintermaterialien in Kapitel 5 grundlegend charakterisiert, um eigene verlässliche Kennwerte und Spannungs-Dehnungs-Kurven zu bekommen, die unter klar definierten und reproduzierbaren Randbedingungen ermittelt wurden.

### Spritzgussmaterial

Die Materialkennwerte von Spritzgusswerkstoffen sind häufig in herstellerübergreifenden Datenbanken wie der CAMPUS-Datenbank oder dem Material Data Center zusammengefasst. Problematisch ist allerdings, dass die Datensätze oftmals unvollständig sind. Bei vielen Werkstoffen fehlen wichtige Kennwerte. In der CAMPUS-Datenbank [17] sind aktuell ca. 4600 Werkstoffe gelistet (siehe Tabelle 4.4). Immerhin ist für ca. 90 % der aufgeführten Werkstoffe der Zug-E-Modul eingetragen. Hinsichtlich der Verfügbarkeit von Kurzzeit-Festigkeitskennwerten sieht es jedoch schon wesentlich schlechter aus. Diese sind für weniger als die Hälfte der gelisteten Werkstoffe vorhanden. Noch schlechter ist es um die Verfügbarkeit von Langzeit-Kennwerten bestellt. Lediglich für ca. 12 % der Werkstoffe ist der Zug-Kriechmodul für eine Belastungsdauer von 1.000 h angegeben.

Tabelle 4.4: Auswertung zur Vollständigkeit der Datensätze in der CAMPUS-Datenbank [17]

Materialdatenbank CAMPUS			
Anzahl gelisteter Werkstoffe	4604		
davon mit Angabe	Abkürzung	Anzahl	prozentualer Anteil
des Zug-E-Moduls	$E_t$	4075	88,5 %
der Bruchspannung	$\sigma_B$	2175	47,2 %
der Bruchdehnung	$\varepsilon_B$	2271	49,3 %
der Streckspannung	$\sigma_Y$	1563	33,9 %
der Streckdehnung	$\varepsilon_Y$	1563	33,9 %
des Zug-Kriechmoduls für 1h	$E_{tc\ 1\ h}$	503	10,9 %
des Zug-Kriechmoduls für 1000 h	$E_{tc\ 1.000\ h}$	569	12,4 %

Datum der Auswertung: 07.03.2016

Auch im Material Data Center fehlen bei vielen Werkstoffen wichtige Kennwerte. Zum Beispiel ist nur bei ca. der Hälfte der gelisteten Werkstoffe der Zug-E-Modul angegeben. Noch unvollständiger sind die Angaben bei Kennwerten, die das viskoelastische Verhalten beschreiben. So sind bei nicht einmal 2 % der enthaltenen Werkstoffe isochrone Spannungs-Dehnungs-Diagramme hinterlegt. Andere Kennwerte wie die Querkontraktionszahl, die kritische Dehnung oder Angaben zur dynamischen Belastbarkeit fehlen sogar gänzlich in derartigen Datenbanken [115].

Auch die Firma EMS-Chemie stellt für die verwendeten Spritzgussmaterialien Datenblätter mit grundlegenden Werkstoffkennwerten zur Verfügung (siehe Tabelle 4.2). Die Angaben in den Datenblättern sind wesentlich sorgfältiger dokumentiert als die der Sintermaterialien. Für ausgewählte Kennwerte sind sogar Angaben für zwei Konditionierungszustände (siehe Abschnitt 4.4) vorhanden. Zusätzlich werden vom Werkstofflieferanten Spannungs-Dehnungs-Diagramme sowie Kriechkurven für zwei der drei eingesetzten Werkstoffe bereitgestellt. Einzig die Form des verwendeten Probestabs ist nicht angegeben, sodass nur angenommen werden kann, dass die Kennwerte mit direkt gespritzten Prüfkörpern des Typs 1A (siehe Abbildung 4.4) ermittelt wurden.

### 4.3 Bezeichnung und Orientierung der Probestäbe

Sowohl für die Sinterproben als auch für die spritzgegossenen Probestäbe wird im Rahmen dieser Ausarbeitung ein spezielles Bezeichnungssystem verwendet. Insbesondere bei den Sinterproben ist eine eindeutige Kennzeichnung der Probestäbe notwendig, damit die Ausrichtung der Probestäbe während des Sinterprozesses auch nach der Entformung noch eindeutig nachvollziehbar ist.

#### 4.3.1 Sinterproben

Die Definition der Raumkoordinaten einer Sinteranlage wurde in Unterabschnitt 3.3 erläutert. Die definierten Raumkoordinaten werden nachfolgend zur Ausrichtung und Bezeichnung der lasergesinterten Probestäbe verwendet. Zur eindeutigen Kennzeichnung werden die Stäbe an den Einspannstellen mit kleinen Kerben und/oder Nasen versehen (siehe Abbildung 4.3). Die Kenntnis der exakten Ausrichtung der Probestäbe ist wichtig, um die anisotropen Eigenschaften von glaskugelgefüllten Sinterpolyamiden zu charakterisieren (siehe Abschnitt 5.2).

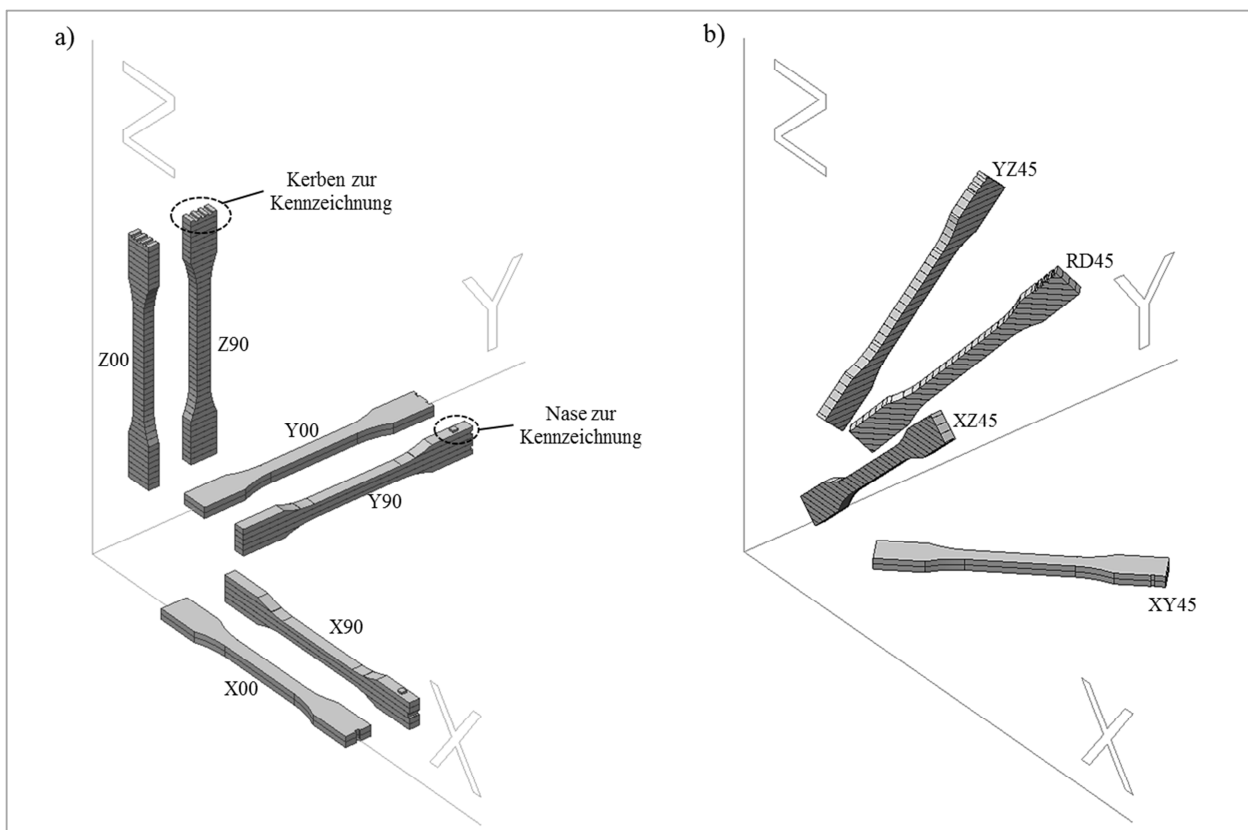


Abbildung 4.3: Kennzeichnung und Bezeichnung der lasergesinterten Probestäbe; Bild a) Bezeichnung der parallel angeordneten Probestäbe; Bild b) Bezeichnung der diagonal angeordneten Probestäbe

Alle Probestäbe, die während des Sinterprozesses so orientiert sind, dass ihre Längsachse parallel zu einer der Raumkoordinaten verläuft, werden gemäß Bild a) der Abbildung 4.3 bezeichnet. Als erste Referenz wird die Richtung der Längsachse und als zweite der Winkel zwischen der Ober- bzw. Unterseite des Stabes und der XY- bzw. der XZ-Ebene verwendet. Zusätzlich zu den Probestäben, deren Längsachse parallel zu einer der drei Hauptachsen der Sinteranlage verläuft, werden Probestäbe untersucht, die unter 45° in den drei Hauptebenen und entlang der Raumdiagonalen ausgerichtet sind (Bild b) der Abbildung 4.3). Um die Versuchsergebnisse eindeutig zu unterscheiden, werden zusätzlich zur Angabe der Ausrichtung eine laufende Nummer, die Form des Probestabs, die Dicke der Stäbe, der Probenzustand, die Prüf-

geschwindigkeit und die Charge benötigt. Aus diesem Grund werden auch diese Informationen in die Bezeichnung der Probestäbe integriert. Zum besseren Verständnis ist nachfolgend ein Beispiel angegeben.

Kurzform: **X00\_18\_1BA\_2mm\_lf\_1u50\_02**

Bedeutung:	X	-	Längsachse des Stabes in X-Richtung der Anlage
	00	-	Winkel zwischen Probenoberseite und XY-Ebene gleich 0°
	18	-	Probestab Nummer 18
	1BA	-	Probestab der Typs 1 BA gemäß DIN EN ISO 527-2
	2 mm	-	Dicke des Probestabs 2 mm
	lf	-	Konditionierungszustand des Probestabs luftfeucht
	1u50	-	Prüfgeschwindigkeit im Zugversuch 1 und 50 mm/min
	02	-	Charge 02

#### 4.3.2 Spritzgießproben

Die Richtungsabhängigkeit der mechanischen Kennwerte von Spritzgusswerkstoffen wird mit Probestäben ermittelt, die unter verschiedenen Winkeln aus einer spritzgegossenen Platte mit Filmanguss herausgetrennt wurden. In Abbildung 4.4 ist die Ausrichtung einer Zugprobe des Typs 1 BA dargestellt, deren Längsachse in einem 30°-Winkel zur Fließrichtung orientiert ist.

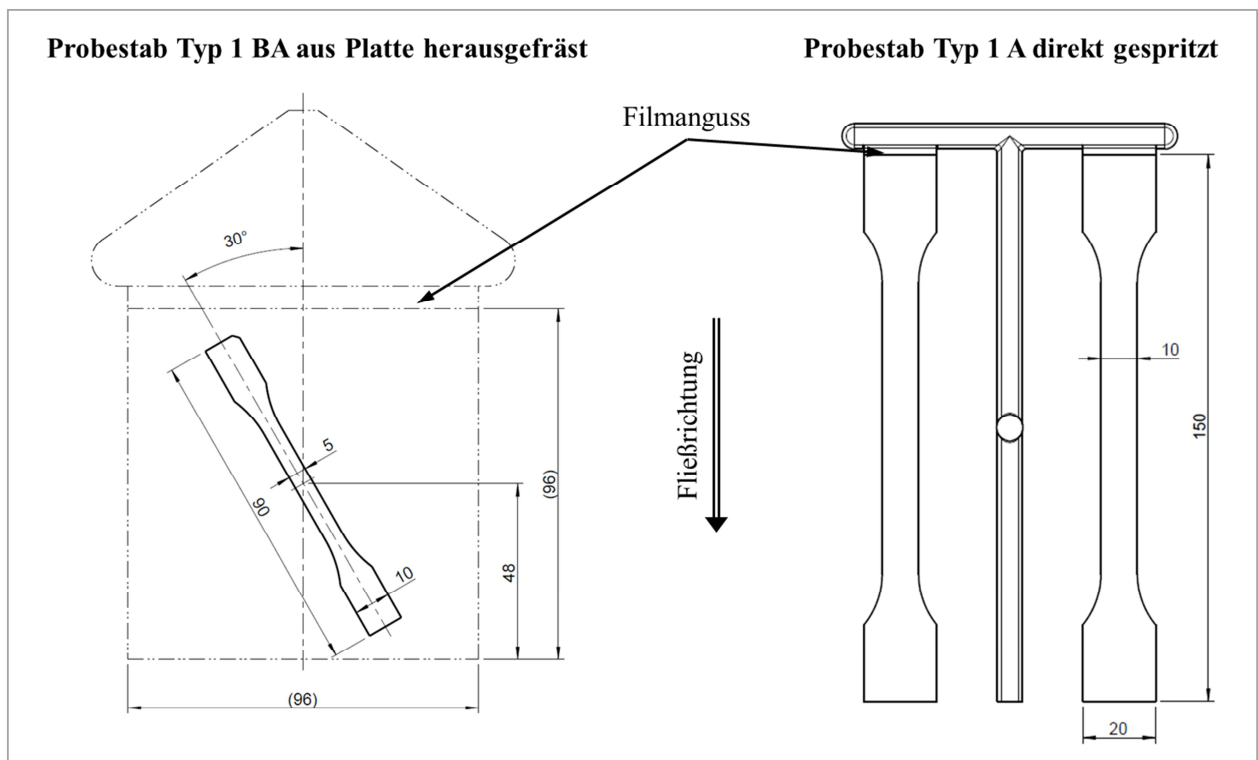


Abbildung 4.4: Ausrichtung der Probestäbe bezüglich der Fließrichtung

Zur Bezeichnung der Stäbe wird der Winkel zwischen der Längsachse des Stabes und der Spritzrichtung angegeben. Zusätzlich werden alle Probestäbe, die aus einer Platte herausgetrennt (Typ 1 BA) werden, mit einem „P“ und direkt gespritzte Prüfkörper (Typ 1 A) mit „DI“ gekennzeichnet. Zur besseren Übersicht ist nachfolgend eine Beispielbezeichnung eines Probekörpers aufgeführt.



Kurzform: **P30\_36\_1BA\_2mm\_lf\_1u50\_01**

Bedeutung:	P	-	Probestab aus Platte herausgefräst
	30	-	Längsachse der Probe unter 30 ° zur Fließrichtung orientiert
	36	-	Probestab Nummer 36
	1BA	-	Probestab des Typs 1 BA
	2 mm	-	Dicke des Probestabs 2 mm
	lf	-	Konditionierungszustand des Probestabs luftfeucht
	1u50	-	Prüfgeschwindigkeit im Zugversuch 1 und 50 mm/min
	01	-	Charge 01

#### 4.4 Vorbereitung/Lagerung der Proben

Vor der Prüfung müssen Probekörper gemäß der internationalen Norm für den zu prüfenden Werkstoff vorbehandelt werden, da die Vorbehandlung speziell bei Kunststoffen einen großen Einfluss auf die Kennwerte haben kann. Existiert keine Norm zur Vorbehandlung des jeweiligen Werkstoffs, so muss die geeignetste Vorbehandlung aus DIN EN ISO 291 ausgewählt werden [116]. Um reproduzierbare Versuchsergebnisse zu erzielen, werden alle Probestäbe und Bauteile, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht werden, definiert vorbehandelt. Die Vorbehandlung erfolgt auf zwei unterschiedliche Arten. Die Ergebnisse, die mit dem Hinweis spritz- bzw. sinterfrisch (sf) versehen sind, werden mithilfe von Sinterbauteilen ermittelt, die direkt nach Herstellung untersucht werden. Alle anderen Versuchsergebnisse werden mit luftfeuchten (lf) Probekörpern generiert. Der luftfeuchte Zustand wird durch Konditionieren erreicht.

Konditionieren bedeutet Feuchtigkeitsaufnahme bis zum Gleichgewichtszustand in einer Atmosphäre mit einer bestimmten Temperatur und einer definierten Luftfeuchtigkeit [65]. Grundsätzlich werden die drei Konditionierungszustände trocken, luftfeucht und nass unterschieden. Erreicht werden sie durch Lagerung bis zur Gewichtskonstanz in einer definierten Umgebung [9]. Der luftfeuchte Zustand ergibt sich beispielsweise durch Lagerung im Normklima 23/50 bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit [54]. Zur beschleunigten Konditionierung von Probekörpern aus Polyamid existiert eine eigene Norm (DIN EN ISO 1110), die auch für die in diesem Vorhaben eingesetzten Probekörper und Bauteile verwendet wird. Die Geschwindigkeit der Feuchteaufnahme ist temperaturabhängig. Deshalb sieht die Norm die Lagerung der Proben bei einer Temperatur von 70 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 62 % vor. Die Erreichung des Gleichgewichtszustands wird durch regelmäßiges Wiegen überprüft. Der erreichte Gleichgewichtsfeuchtegehalt entspricht annähernd dem luftfeuchten Zustand, der im Normklima 23/50 nach langer Lagerung erreicht wird. Zum Beispiel wäre für eine 4 mm dicke PA66-Probe eine Lagerung von mehr als einem Jahr erforderlich. Durch die Lagerung bei erhöhter Temperatur wird dieser Zustand in wesentlich kürzerer Zeit erreicht. Nach dem Erreichen des Gleichgewichtszustands werden die Proben bis zur Prüfung im Normklima 23/50 gelagert [65].

#### 4.5 Einachsiger Zugversuch

Die üblichste Methode zur Bestimmung des Zugverformungsverhaltens von Kunststoffen ist der einachsige Kurzzeit-Zugversuch gemäß DIN EN ISO 527 Teil 1 bis 5 [116]. Mithilfe dieses Versuchs können charakteristische mechanische Eigenschaften ermittelt werden, die für die Dimensionierung von Kunst-

stoffbauteilen benötigt werden [9] [55]. In der Norm werden die Grundsätze zur Bestimmung der Zugeigenschaften von Kunststoffen und Kunststoffverbunden festgelegt. Die beschriebenen Verfahren sind gemäß der Norm zur Anwendung bei drei Werkstoffgruppen geeignet. Generativ hergestellte Kunststoffe werden nicht explizit genannt. Kaddar [47] führt in seinem Beitrag an, dass Sinterwerkstoffe eine gewisse Nähe zu steifen und halbsteifen thermoplastischen Spritzguss- und Extrusionsformmassen aufweisen. Aus diesem Grund verwendet er die DIN EN ISO 527 ebenfalls zur Prüfung von Sinterwerkstoffen. In diesem Beitrag wird auf gleiche Weise verfahren.

### 4.5.1 Kennwerte des einachsigen Zugversuchs

Im einachsigen Zugversuch können je nach Art des Kunststoffs eine Reihe von Kennwerten ermittelt werden. Abbildung 4.5 zeigt schematisch die charakteristischen Spannungs-Dehnungs-Diagramme von vier verschiedenen Kunststoffgruppen (a - spröde Werkstoffe, b und c - zähe Werkstoffe mit Streckgrenze, d - zähe Werkstoffe ohne Streckgrenze).

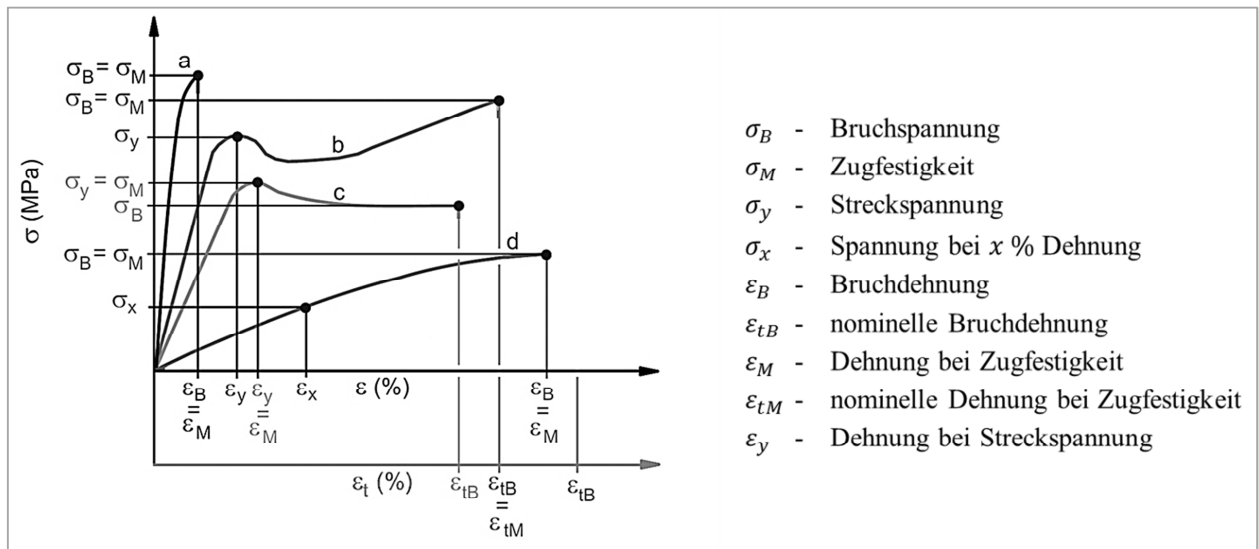


Abbildung 4.5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm und charakteristische Kenngrößen von verschiedenen Kunststoffen [117]

Zusätzlich zu den aufgeführten Kennwerten, die sich aus Makroschädigungen ergeben und direkt aus den Spannungs-Dehnungs-Kurven ablesbar sind, kann im Zugversuch unter Zuhilfenahme eines zweiten Dehnungsaufnehmers, der die Querdehnung der Probe erfasst, die Poisson-Konstante (siehe Unterabschnitt 4.5.2) bestimmt werden [9]. Zudem können durch die Verwendung von weiteren Hilfsmitteln bestimmte Mikroschädigungsgrenzen (siehe Unterabschnitt 4.5.3), wie z. B. die kritische Dehnung, bestimmt werden.

### 4.5.2 Poisson-Konstante

Die Poisson-Konstante ( $\nu$ ) wird auch Querkontraktionszahl genannt. Sie wird mit speziellen Dehnungsaufnehmern gemessen, die sehr hohe messtechnische Anforderungen erfüllen müssen, da die Querdehnung sehr klein ist [118]. Für vollkommen elastische und isotrope Werkstoffe ist die Querkontraktionszahl konstant. Spritzgegossene und lasergesinterte Kunststoffbauteile verhalten sich in der Regel weder isotrop noch vollkommen elastisch. Dies führt dazu, dass Kunststoffe unterschiedliche Querkontraktionszahlen in den verschiedenen Richtungen besitzen. Die Querkontraktionszahlen von Kunststoffen sind

darüber hinaus von der Temperatur ( $T$ ), der Belastungshöhe ( $\sigma$ ) und der Belastungsdauer ( $t$ ) abhängig. Der Zusammenhang kann näherungsweise mit Gleichung (4.1) beschrieben werden [9].

$$\nu_{(T,\sigma,t)} = \nu_0 + (\nu_{pl} - \nu_0) \cdot \left(1 - \frac{E_{T(t,T,\sigma)}}{E_0}\right) \quad (4.1)$$

mit:

- $\nu_0$  = Querkontraktionszahl für den elastischen Bereich (siehe Tabelle 4.5)
- $\nu_{pl}$  = Querkontraktionszahl für den plastischen Bereich ( $\nu_{pl} = 0,5$ )
- $E_T$  = Tangentenmodul
- $E_0$  = Ursprungsmodul

Gemäß Gleichung (4.1) nähert sich die Querkontraktionszahl mit zunehmender Belastungszeit und Belastungshöhe sowie steigender Temperatur dem Wert 0,5. Die Querkontraktionszahl von homogenen und isotropen Werkstoffen liegt in der Regel zwischen 0,3 und 0,5. Eine Querkontraktionszahl von 0,5 bedeutet Volumenkonstanz [119]. In Tabelle 4.5 sind für einige Kunststoffe bzw. für gewisse Werkstoffgruppen Werte für die Querkontraktionszahl angegeben.

Tabelle 4.5: Querkontraktionszahlen von Kunststoffen gemäß [9] [74]

Material	Querkontraktionszahl $\nu_0$	Quelle
Harte Kunststoffe bei niedrigen Lasten und Temperaturen und kurzzeitiger Beanspruchung z. B. PS, PMMA, PA 66, PA 6 bei 20°C	0,33	Ehrenstein [9]
Duktile Kunststoffe bei erhöhten Lasten und Temperaturen und langzeitiger Beanspruchung	0,45	
PA 66, PA 6 bei 23 °C PA 66, PA 6 bei 100 °C	0,33 0,45	
Polycarbonat PC	0,42	Korte [74]
Polypropylen PP	0,40	

### 4.5.3 Mikroschädigungsgrenzen

Makroschädigungsgrenzen wie die Streckspannung oder die Zugfestigkeit lassen sich im Zugversuch sehr gut bestimmen. Jedoch treten bereits bei viel geringeren Beanspruchungen irreversible Mikroschädigungen im Material auf. Diese können im Zugversuch nicht oder nur mit zusätzlichem Aufwand ermittelt werden. Eine Möglichkeit zur Bestimmung des Beanspruchungsniveaus, bei dem frühzeitig ablaufende Mikroschädigungen auftreten, ist zum Beispiel die Kopplung des Zugversuchs mit der Schallemissionsanalyse (SEA) [117]. Eine derartige irreversible Mikroschädigung ist die kritische Dehnung. Dieser Kennwert wird für die dehnungsbezogene Auslegung von Kunststoffbauteilen benötigt. Die Grundlagen für diese Dimensionierungsmethode wurden in den 1970er-Jahren von Georg Menges und seinen Mitarbeitern erarbeitet [55] [120]. Das Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart beschäftigt sich aktuell mit der Entwicklung eines universell einsetzbaren Schallmesssystems zur Bestimmung der kritischen Dehnung [66].

### 4.5.4 Randbedingungen/Parameter

Die Ergebnisse von Werkstoffprüfungen an Kunststoffen werden durch die Randbedingungen der jeweiligen Prüfung und den sich daraus ergebenden Belastungszustand (siehe Unterabschnitt 2.5.3) beeinflusst.

Deshalb werden nachfolgend die grundlegenden Parameter der durchgeführten Zugversuche dargestellt. Die Ermittlung des Zug-E-Moduls ( $E_t$ ) erfolgt in allen Versuchen mit der in der DIN EN ISO 527 vorgeschriebenen Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min. Die Ermittlung des Moduls erfolgt als Sekante zwischen 0,05 und 0,25 % technischer Dehnung. Nach der Bestimmung des Moduls wird die Prüfgeschwindigkeit automatisch erhöht. Dieses Vorgehen ist in der Praxis üblich, auch wenn es nach DIN EN ISO 527 nicht normgerecht ist. Der maximale Fehler bei der Bestimmung von Streck- und Bruchdehnung, der durch dieses Vorgehen entstehen kann, wird von Deckard [41] auf 0,2 % beziffert. Für die Prüfgeschwindigkeit gibt die zuvor genannte Norm einen relativ großen Bereich vor. Aus diesem Grund wird in DIN EN ISO 10350 eine weitere Konkretisierung vorgenommen. Diese Norm sieht für spröde Kunststoffe mit einer Bruchdehnung kleiner 10 % eine Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min und für die restlichen Kunststoffe eine Geschwindigkeit von 50 mm/min vor [117]. Die Zugversuche zur systematischen Charakterisierung des Materialverhaltens in Kapitel 5 werden teilweise mit beiden Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt, um den Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die mechanischen Eigenschaften zu charakterisieren (siehe Abschnitt 5.4). Die jeweils verwendete Geschwindigkeit wird bei der Ergebnisdarstellung angegeben. Für die Zugprüfungen werden Probekörper des Typs 1 A und 1 BA (siehe Abbildung 4.4) gemäß DIN EN ISO 527-2 verwendet. Die Norm sieht für die Stäbe 1 BA eine Dicke von  $\geq 2$  mm vor. Zur Ermittlung des Dickeneinflusses in Abschnitt 5.5 werden Probekörper in zwei und vier Millimeter Dicke verwendet. Darüber hinaus werden die Probekörper sowohl im sinterfrischen als auch im luftfeuchten Zustand geprüft, um den quantitativen Einfluss der Wasseraufnahme (siehe Abschnitt 5.3) auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben zu charakterisieren. Alle Einzelversuche werden mindestens fünfmal wiederholt. Die Spezifikation der verwendeten Zugprüfmaschine ist in Tabelle 4.6 zusammengefasst.

Tabelle 4.6: Konfiguration der verwendeten Zugprüfmaschine

Komponente	Hersteller	Typ	Größe
Lastrahmen	Zwick	RetroLine	100 kN
Steuerung	Zwick	testControl II	-
Probenhalter	Zwick	Pneumatik-Probenhalter	10 kN
		Typ 8397	
Kraftaufnehmer	Zwick	Xforce HP	10 kN
Dehnungsaufnehmer	Zwick	digiClip	-
		Typ 078779	

## 5 Systematische Werkstoffcharakterisierung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zur Charakterisierung und Quantifizierung des Einflusses ausgewählter Einflussgrößen ausführlich diskutiert. Die systematische Werkstoffcharakterisierung ist die Basis für eine reproduzierbare wissenschaftliche Betrachtung. Sie ist notwendig, um ein eigenes, umfassendes Bild von den mechanischen Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe zu bekommen, da insbesondere die vom Pulverhersteller zur Verfügung gestellten Materialkennwerte für eine Bauteildimensionierung nicht ausreichend sind (siehe Unterabschnitt 4.2.2). Darüber hinaus sind die verfügbaren Untersuchungsergebnisse für lasergesintertes PA 12 teilweise widersprüchlich. Dies wird am Beispiel der Duktilität in Baurichtung deutlich. Wegner [85] hat in seinen Versuchen ermittelt, dass die Bruchdehnung von in Z-Richtung orientierten Probekörpern erheblich geringer ist als die von Probekörpern, deren Längsachse im Sinterprozess parallel zur XY-Ebene lag. Blattmeier [48] hingegen beschreibt in ihrer Arbeit ältere Versuche, bei denen für die Bruchdehnung von in Z-Richtung orientierten Stäben die größten Werte gemessen wurden. Begründet wird dieses Ergebnis damit, dass sich die Bereiche zwischen den Schichten leichter verformen als das Material innerhalb einer Schicht, da dieses im Sinterprozess stärker verdichtet wurde [48]. Die vorhandenen Kennwerte und Untersuchungsergebnisse genügen nicht, um zu überprüfen, ob mithilfe von lasergesinterten Prototypen die Verifikation von Simulationsergebnissen und die quantitative Absicherung von Bauteilkonzepten eines späteren Spritzgießteils möglich sind. Insbesondere für die Eigenschaften des glaskugelgefüllten Sinterpolyamids sind bisher kaum wissenschaftliche Untersuchungen verfügbar. Des Weiteren werden keine Spannungs-Dehnungs-Diagramme bereitgestellt. Aus den genannten Gründen werden nachfolgend die in Unterabschnitt 2.6.4 genannten Einflussgrößen für lasergesintertes und spritzgegossenes PA 12 charakterisiert und quantifiziert, um ein grundlegendes Verständnis des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der ausgewählten Werkstoffe (siehe Tabelle 4.2) zu bekommen.

### 5.1 Charakterisierung des Einflusses der Glaskugeln

Aufgrund der unvollständig dokumentierten Materialkennwerte des Sintermaterials und der fehlenden Spannungs-Dehnungs-Diagramme werden eigene Versuche zur Quantifizierung des Einflusses der Glaskugel durchgeführt. Zusätzlich werden vergleichende Untersuchungen an lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben vorgenommen, um herauszufinden, ob die Ausprägung des Einflusses der Glaskugeln trotz der unterschiedlichen Fertigungsverfahren vergleichbar ist. Ein grundsätzlicher Unterschied zwischen glaskugelgefüllten Sinter- und Spritzgussmaterialien besteht darin, dass Sintermaterialien Trockenmischungen und keine Compounds wie im Spritzgießbereich sind. Polymerpulver und Füllstoff werden lediglich mechanisch miteinander vermischt [13]. Im Gegensatz dazu werden bei der Compoundierung von Spritzgussmaterialien die Glaskugeln und die aufgeschmolzene Polymermatrix in einem Extruder miteinander vermischt, sodass die Glaskugeln vollständig mit Matrixmaterial umhüllt werden. In Abbildung 5.1 ist sehr gut zu erkennen, dass dies beim glaskugelgefüllten Sintermaterial nicht der Fall ist. Pulverkörner und Glaskugeln (transparente, sphärische Partikel) liegen getrennt nebeneinander vor. Lediglich einige kleinere Pulverkörner haben sich durch die wiederholte Verwendung des Sinterpulvers mit den Glaskugeln verbunden (siehe auch Abbildung 10.1 im Anhang). Die abgebildete Pulverprobe wurde nach einem Sintervorgang aus dem Partcake entnommen. Die Glaskugeln haben bei Neupulver in etwa den gleichen Durchmesser wie die Pulverkörner. Die Körnung des Pulvers und der mittlere Kugeldurchmesser liegen bei ca. 60 µm. Abbildung 5.1 zeigt eine Mikroskopaufnahme des glaskugelgefüllten PA 12,

in der der Durchmesser einiger Glaskugeln vermessen ist. Aus den 15 vermessenen Kugeln ergibt sich ein mittlerer Kugeldurchmesser von 62,7  $\mu\text{m}$ .

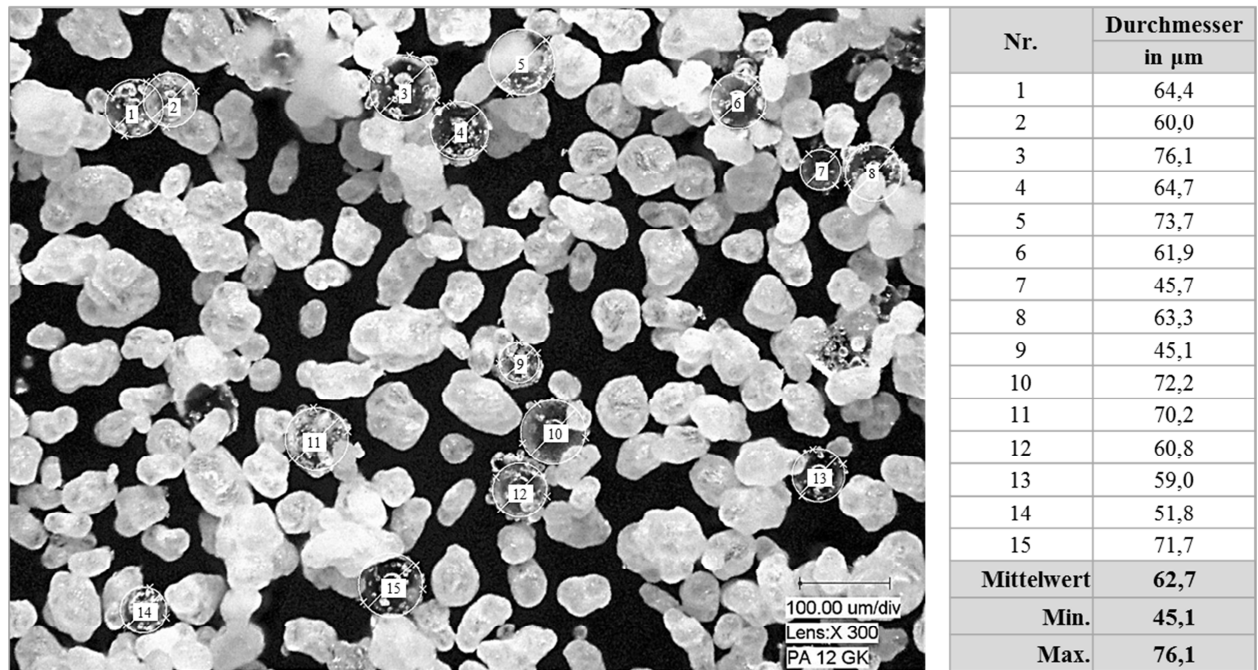


Abbildung 5.1: Durchmesser der Glaskugeln des verwendeten Sintermaterials PA 12 GK 40

### 5.1.1 Wirkung von isometrischen Füllstoffen

Isometrische Füllstoffe, wie z. B. Glaskugeln, die in eine Polymermatrix eingebettet werden, wirken dehnungsbehindernd. Ein glaskugelgefüllter Kunststoffwerkstoff hat deshalb im Vergleich zum ungefüllten Material eine höhere Steifigkeit [121]. Darüber hinaus zeichnen sich glaskugelgefüllte Kunststoffe durch gute Maßkonstanz, geringe Verzugsneigung sowie glatte, optisch ansprechende Oberflächen und gutes Fließvermögen aus. Die Schwindung dieser Materialien ist weitestgehend isotrop [122]. Glaskugeln wirken in Polymerschmelzen wie die Kugeln eines Wälzlagers und reduzieren die Fließfähigkeit im Vergleich zu Fasern nur geringfügig, dadurch können hohe Füllgrade realisiert werden. Durch den Zusatz von Glaskugeln werden die Zug- und die Druckfestigkeit von Kunststoffen ebenfalls erhöht. Kugelförmige Füllstoffe haben jedoch im Vergleich zu faserförmigen nur eine schwache Wirkung auf die Festigkeit. Die Benetzbarkeit der Glaskugeln hat maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des späteren Bauteils. Aus diesem Grund werden in der Regel Haftvermittler zur Erhöhung der Benetzbarkeit eingesetzt [123] [124]. Haftvermittler bilden Brücken zwischen den Grenzflächen zweier Komponenten, z. B. zwischen den Glaskugeln und der Polymermatrix. Als Haftvermittler für Glasfasern und Glaskugeln werden häufig Silane verwendet (siehe Abbildung 10.2 im Anhang). Die eine reaktive Gruppe der Silane verbindet sich mit der Oberfläche der Glaskugeln und die andere mit der Polymermatrix [60] [125].

Abbildung 5.2 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Kurven von ungefülltem und glaskugelgefülltem PA 12 im direkten Vergleich. Dargestellt sind die Kurven von sinter- bzw. spritzfrischen Zugproben. Am steileren Kurvenverlauf der gefüllten Probestäbe ist der steifigkeitssteigernde Effekt, der durch den Zusatz von Glaskugeln erreicht wird, zu erkennen. Die geringe festigkeitssteigernde Wirkung, die Glaskugeln gemäß Bühring-Polaczek [123] ebenfalls haben, ist nur bei den spritzgegossenen Probestäben feststellbar. Die Zugfestigkeit der ungefüllten und der glaskugelgefüllten Sinterproben ist etwa gleich hoch.

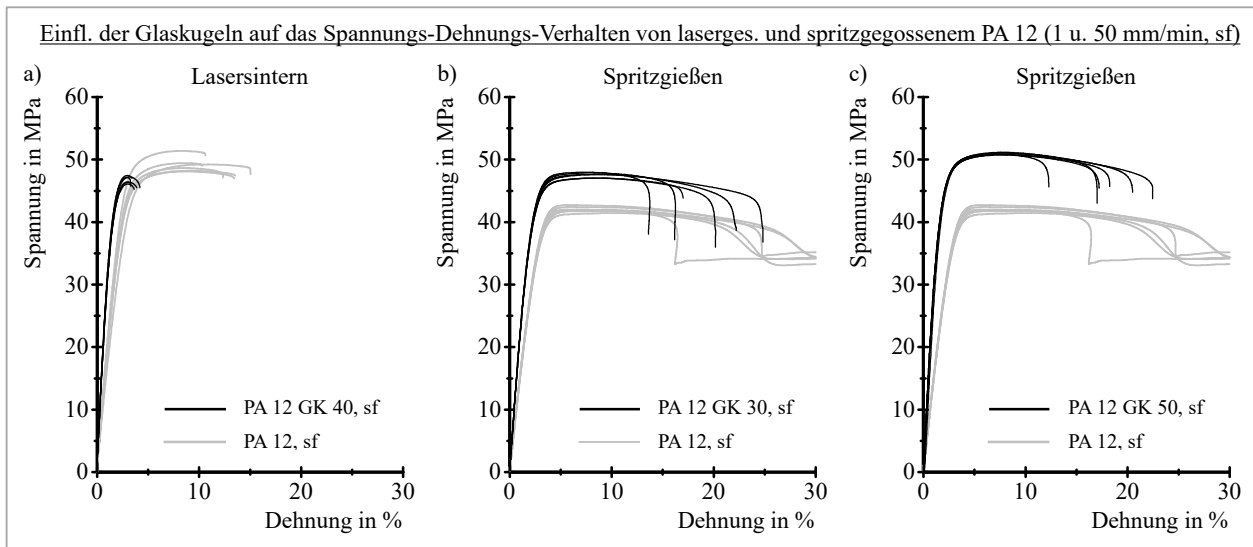


Abbildung 5.2: Spannungs-Dehnungs-Kurven von sinter- bzw. spritzfrischen Probestäben aus ungefülltem und glaskugelgefülltem PA 12 im direkten Vergleich

Am Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurven von luftfeuchten Spritzgießproben ist, wie bereits bei den Kurven der spritzfrischen Stäbe, die steifigkeitssteigernde als auch die festigkeitserhöhende Wirkung von Glaskugeln deutlich zu sehen (Diagramm b) und c) in Abbildung 5.3). Die Kurven der luftfeuchten Sinterproben zeigen allerdings einen durch den Zusatz von Glaskugeln nicht zu erklärenden erheblich flacheren Verlauf als die der ungefüllten Probestäbe (Diagramm a) in Abbildung 5.3).

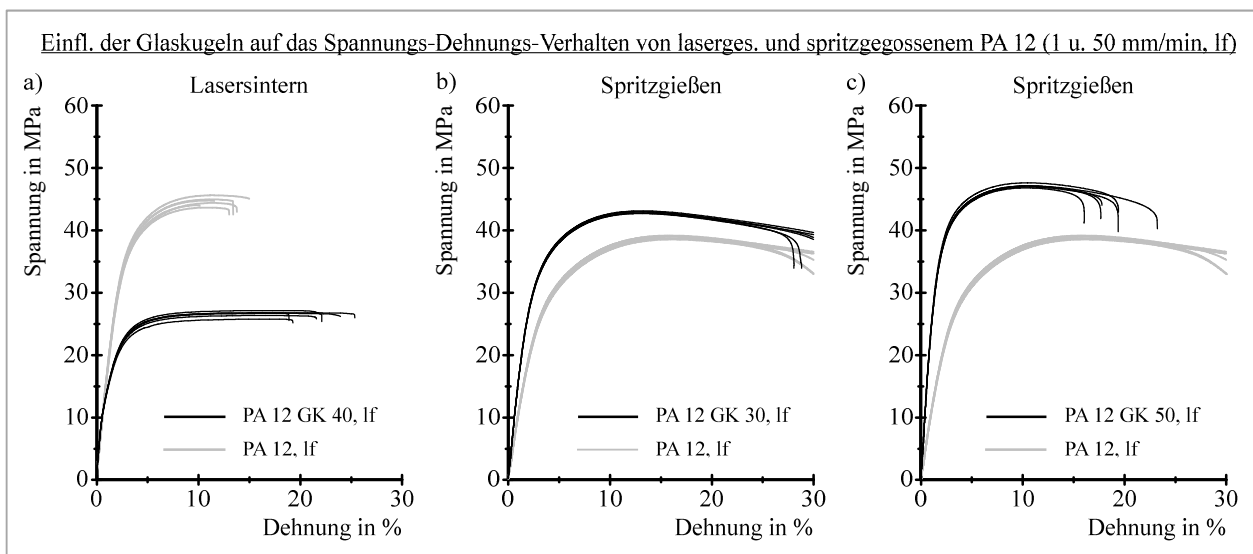


Abbildung 5.3: Spannungs-Dehnungs-Kurven von luftfeuchten Probestäben aus ungefülltem und glaskugelgefülltem PA 12 im direkten Vergleich

Da der Zusatz der Glaskugeln im sinterfrischen Zustand keinen derartig hohen Festigkeitsabfall bewirkt, muss der Grund für die starke Beeinflussung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens eine Kombination aus dem Zusatz der Glaskugeln und der Konditionierung der Proben sein. Der Einfluss der Wasseraufnahme und die Gründe für die starke Beeinflussung der glaskugelgefüllten Sinterproben werden in Abschnitt 5.3 eingehend analysiert. In den folgenden Unterabschnitten wird der quantitative Einfluss von Glaskugeln auf die Kennwerte des Zugversuchs ausführlich diskutiert.

### 5.1.2 Einfluss der Glaskugeln auf den Zug-E-Modul

Gemäß den Angaben in den Datenblättern der Materialhersteller haben die glaskugelgefüllten Werkstoffe durchgängig einen höheren Zug-E-Modul als die ungefüllten (siehe Tabelle 5.1). Die Versuchsergebnisse bestätigen die steifigkeitssteigernde Wirkung der Glaskugeln. Der Zug-E-Modul der glaskugelgefüllten Stäbe war in allen Versuchsreihen höher als der Modul der ungefüllten Probestäbe. Dies gilt sowohl für die spritzgegossenen als auch für die lasergesinterten Probestäbe.

Tabelle 5.1: Einfluss der Glaskugeln auf den Zug-E-Modul von spritzgegossenem und lasergesintertem PA 12, Quellen der Datenblattkennwerte [11], [12], [107], [108], [109], [110], [111] und [112]

Material- bezeichnung	Gewichtsanteil Glaskugeln	Ver- arbeitung	Probe- stab	Prüf- geschw. mm/min	Richtung	trocken			luftfeucht			Quelle
						E-Modul	Standard- abweichung	proz. Verän- derung	E-Modul	Standard- abweichung	proz. Verän- derung	
	%					MPa	MPa		MPa	MPa		
Grilamid L 20 G	-	SG	k.A.	1	direkt	1600	k.A.		1100	k.A.		DB
Grilamid LKN 3H	30	SG	k.A.	1	direkt	1900	k.A.	18,8%	1600	k.A.	45,5%	DB
Grilamid LKN 5H	50	SG	k.A.	1	direkt	2600	k.A.	62,5%	2300	k.A.	109,1%	DB
Grilamid L 20 G	-	SG	1A	1	direkt	1377	22,4		903	12,2		Versuch
Grilamid LKN 3H	30	SG	1A	1	direkt	2075	27,6	50,7%	1417	7,6	56,9%	Versuch
Grilamid LKN 5H	50	SG	1A	1	direkt	2973	24,9	116,0%	2359	22,7	161,1%	Versuch
PA 2200	-	SLS	k.A.	k.A.	X	1650 **	k.A.		1650 **	k.A.		DB
			k.A.	k.A.	Y	1650 **	k.A.		1650 **	k.A.		DB
			k.A.	k.A.	Z	1650 **	k.A.		1650 **	k.A.		DB
PA 3200 GF	40	SLS	k.A.	k.A.	X	3200 **	k.A.	93,9%	3200 **	k.A.	93,9%	DB
			k.A.	k.A.	Y	3200 **	k.A.	93,9%	3200 **	k.A.	93,9%	DB
			k.A.	k.A.	Z	2500 **	k.A.	51,5%	2500 **	k.A.	51,5%	DB
PA 2200	-	SLS	1BA	1	X	1758	101,9		1493	51,2		Versuch
			1BA		Y	1882	54,5		1558	116,8		Versuch
			1BA		Z	1814	83,5		1530	67,6		Versuch
PA 3200 GF	40	SLS	1BA	1	X	3198	77,7	81,9%	1768	8,4	18,4%	Versuch
			1BA		Y	3262	40,5	73,3%	1782	18,9	14,4%	Versuch
			1BA		Z	3156	74,3	74,0%	1576	49,3	3,1%	Versuch
SG	Spritzgießen											
SLS	Selektives Lasersintern											
DB	Datenblatt											
k.A.	keine Angabe											
**	im Datenblatt fehlt die Angabe des Konditionierungszustands											

Der ermittelte Steifigkeitsanstieg des Spritzgussmaterials ist in beiden Konditionierungszuständen größer als die aus den Datenblattkennwerten berechnete Veränderung des Zug-E-Moduls. Insgesamt ist die prozentuale Steifigkeitsänderung der luftfeuchten Probestäbe etwas größer als die der spritzfrischen Stäbe. In den Datenblättern der Sintermaterialien fehlt die Angabe des Konditionierungszustands. Aus diesem Grund werden für den Vergleich zwischen Versuch und Datenblatt für beide Konditionierungszustände die gleichen Datenblattkennwerte verwendet. Die Wirkung der Glaskugeln auf die Steifigkeit des Sintermaterials ist im sinterfrischen Zustand in X- und Y-Richtung etwas geringer und in Z-Richtung höher als die aus den Datenblattkennwerten berechnete Veränderung. Im luftfeuchten Zustand ist die prozentuale Veränderung des E-Moduls des Sintermaterials merklich kleiner als die berechnete.

Der Anstieg des Zug-E-Moduls des Sintermaterials mit 40 % Glaskugelgewichtsanteil liegt im sinterfrischen Zustand im Mittel bei ca. 76 % und damit zwischen den Werten der beiden Spritzgussmaterialien mit 30 und 50 % Glaskugeln. Aufgrund dieses Ergebnisses ist davon auszugehen, dass die prozentuale Veränderung des E-Moduls von spritzgegossenem und lasergesintertem PA 12 durch die Zugabe von Glaskugeln im sinterfrischen Zustand vergleichbar ist. Im luftfeuchten Zustand ist der prozentuale Anstieg des E-Moduls der lasergesinterten Probestäbe allerdings erheblich kleiner als im sinterfrischen Zustand. Dieses Verhalten passt nicht zu den Versuchsergebnissen der spritzgegossenen Stäbe. Hier liegt der ermittelte Steifigkeitsanstieg unabhängig von Konditionierungszustand in der gleichen Größenordnung. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die feuchtigkeitsbedingte Veränderung der mechanischen Eigen-



schaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Der Einfluss der Wasseraufnahme wird in Abschnitt 5.3 ausführlich diskutiert.

### 5.1.3 Einfluss der Glaskugeln auf die Zugfestigkeit

Gemäß den Datenblattkennwerten haben die glaskugelgefüllten Materialien nicht nur eine höhere Steifigkeit, sondern auch eine höhere Zugfestigkeit als die ungefüllten Materialien (siehe Tabelle 5.2). Die vorliegenden Versuchsergebnisse der spritzgegossenen Proben bestätigen die Angaben in den Datenblättern. Sowohl im trockenen als auch im luftfeuchten Zustand ist die Zugfestigkeit der glaskugelgefüllten Probestäbe um 10 bzw. 20 % höher als die des ungefüllten Materials. Der Grund für den Anstieg der Zugfestigkeit ist, dass die Glaskugeln bei optimaler Kugel/Matrix-Haftung das Abgleiten der Molekülketten behindern, sodass vermehrt Molekülketten auseinandergerissen werden. Diese Ergebnisse bestätigen die Angaben von Gächter [124], dass kugelförmige Füllstoffe nicht nur einen signifikanten Steifigkeitsanstieg, sondern auch einen geringen Festigkeitsanstieg bewirken.

Tabelle 5.2: Einfluss der Glaskugeln auf die Zugfestigkeit von spritzgegossenem und lasergesintertem PA 12, Quellen der Datenblattkennwerte [11], [12], [107], [108], [109], [110], [111] und [112]

Material- bezeichnung	Gewichtsanteil Glaskugeln	Ver- arbeitung	Probe- stab	Prüf- geschw.	Richtung	trocken			luftfeucht			Quelle
						Zugfestigkeit	Standard- abweichung	proz. Verän- derung	Zugfestigkeit	Standard- abweichung	proz. Verän- derung	
	%			mm/min		MPa	MPa	MPa	MPa			
Grilamid L 20 G	-	SG	k.A.	50	direkt	41,0	k.A.		40,0	k.A.		DB
Grilamid LKN 3H	30	SG	k.A.	50	direkt	50,0	k.A.	22,0%	45,0	k.A.	12,5%	DB
Grilamid LKN 5H	50	SG	k.A.	50	direkt	50,0	k.A.	22,0%	45,0	k.A.	12,5%	DB
Grilamid L 20 G	-	SG	1A	50	direkt	42,3	0,6		38,9	0,3		Versuch
Grilamid LKN 3H	30	SG	1A	50	direkt	47,7	0,5	12,8%	42,9	0,2	10,3%	Versuch
Grilamid LKN 5H	50	SG	1A	50	direkt	50,9	0,2	20,4%	47,1	0,3	21,2%	Versuch
PA 2200	-	SLS	k.A.	k.A.	X	48,0	**	k.A.	48,0	**	k.A.	DB
			k.A.	k.A.	Y	48,0	**	k.A.	48,0	**	k.A.	DB
			k.A.	k.A.	Z	42,0	**	k.A.	42,0	**	k.A.	DB
PA 3200 GF	40	SLS	k.A.	k.A.	X	51,0	**	k.A.	51,0	**	k.A.	6,3% DB
			k.A.	k.A.	Y	51,0	**	k.A.	51,0	**	k.A.	6,3% DB
			k.A.	k.A.	Z	47,0	**	k.A.	47,0	**	k.A.	11,9% DB
PA 2200	-	SLS	1BA	50	X	48,7	0,6		44,6	0,7		Versuch
			1BA		Y	49,3	0,3		45,5	0,6		Versuch
			1BA		Z	29,1	4,4		22,9	4,5		Versuch
PA 3200 GF	40	SLS	1BA	50	X	46,8	0,6	-3,9%	26,6	0,5	-40,4%	Versuch
			1BA		Y	48,6	0,4	-1,4%	26,5	0,2	-41,7%	Versuch
			1BA		Z	44,1	1,1	51,4%	23,7	0,3	3,3%	Versuch
SG	Spritzgießen											
SLS	Selektives Lasersintern											
DB	Datenblatt											
k.A.	keine Angabe											
**	im Datenblatt fehlt die Angabe des Konditionierungszustands											

Die Zugfestigkeit des glaskugelgefüllten Sintermaterials ist im sinterfrischen Zustand in X- und Y-Richtung tendenziell etwas geringer und in Z-Richtung deutlich höher als die des ungefüllten Sintermaterials. Der große Festigkeitsanstieg in Z-Richtung ist jedoch auf die zu geringe Festigkeit der ungefüllten Stäbe und nicht auf den Zusatz der Glaskugeln zurückzuführen. Die geringe Festigkeit der ungefüllten Z-Proben ist eine Folge von Fehlern im Sinterprozess, die zum vorzeitigen Versagen der Probestäbe führen, was anhand der Spannungs-Dehnungs-Kurven der entsprechenden Probestäbe eindeutig zu erkennen ist. Der direkte Vergleich der Kurven in Abbildung 5.4 zeigt, dass die Kurven der ungefüllten Z-Proben (Diagramm c)) vor dem Erreichen der Streckspannung abrupt enden. Da in allen anderen Versuchsreihen eine ausgeprägte Streckgrenze zu erkennen ist, war ein derartiges Verhalten nicht zu erwarten.

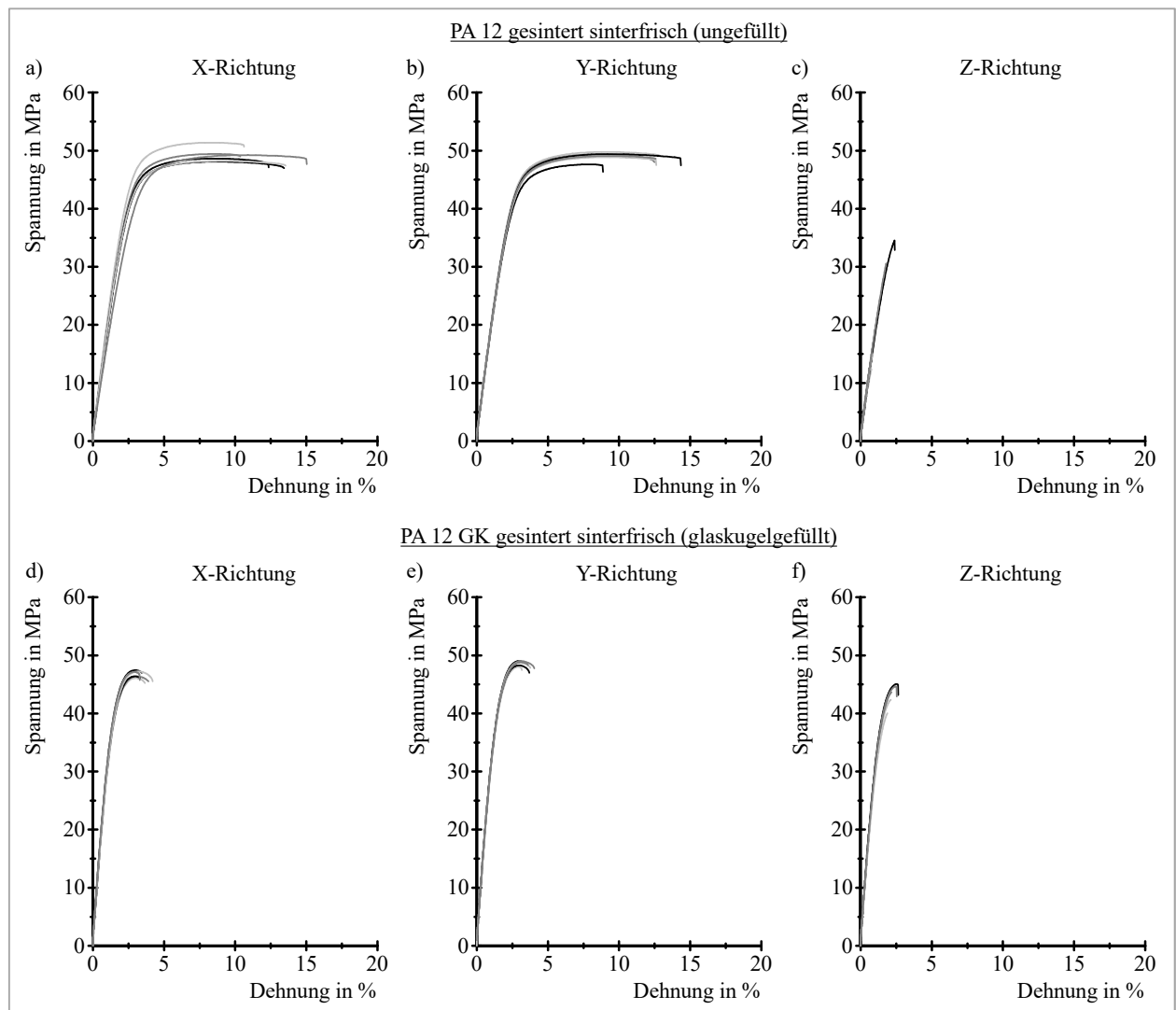


Abbildung 5.4: Spannungs-Dehnungs-Kurven von ungefülltem und glaskugelgefülltem PA 12-Sintermaterial, ermittelt an sinterfrischen Probestäben der Form 1BA mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 und 50 mm/min

Das untypische Verhalten der ungefüllten Z-Proben ist auf die große Anzahl von nicht aufgeschmolzenen Pulverpartikeln zurückzuführen, die auf der Bruchfläche dieser Probestäbe zu erkennen ist (siehe Abbildung 5.5). Im Vergleich dazu sind auf der Bruchfläche der X- bzw. Y-Probe nur sehr wenig nicht aufgeschmolzene Pulverpartikel zu erkennen. Allerdings sind auch auf diesen Flächen Bereiche zu erkennen, in denen die Pulverpartikel nicht vollständig ineineandergeflossen sind, sodass die frühere Kontur der einzelnen Pulverkörner noch zu erkennen ist. Gemäß Abbildung 3.11 auf Seite 43 spricht dies dafür, dass die im Sinterprozess eingebrachte Laserleistung etwas zu gering ist.

Die Bruchfläche der Z-Probe ist im Vergleich zu den anderen beiden Bruchflächen wesentlich ebener, da der Bruch des Z-Stabs weitestgehend zwischen zwei Schichten verläuft. Der Grund hierfür ist, dass die nicht aufgeschmolzenen Partikel im Inneren des Probestabs vorrangig in zur XY-Ebene parallelen Schichten angeordnet sind. Dies zeigt der direkte Vergleich der Schliffbilder einer X00- und einer Z00-Probe in Abbildung 5.6. Der Grund für die flächige Anordnung in Baurichtung ist die Temperaturabnahme in Dickenrichtung einer Schicht (siehe Unterabschnitt 3.5.3), die dazu führen kann, dass lediglich die oberen Partikel vollständig aufschmelzen. Die schichtweise Anordnung von nicht aufgeschmolzenen Pulverpartikeln und Poren führt grundsätzlich zu Zwischenschichten mit geringerer Festigkeit [16].

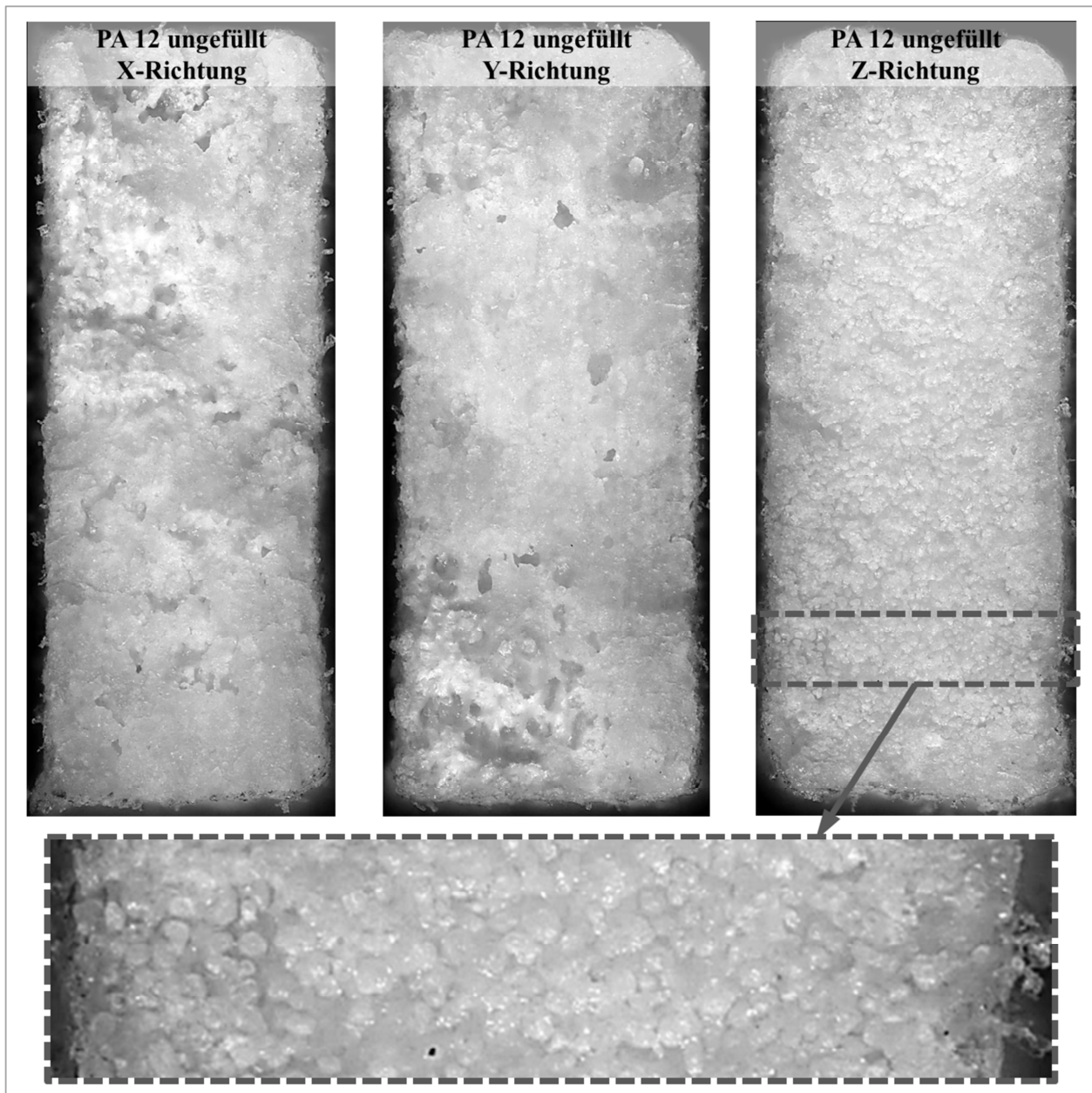


Abbildung 5.5: Bruchflächen von lasergesinterten Probestäben aus ungefülltem PA 12

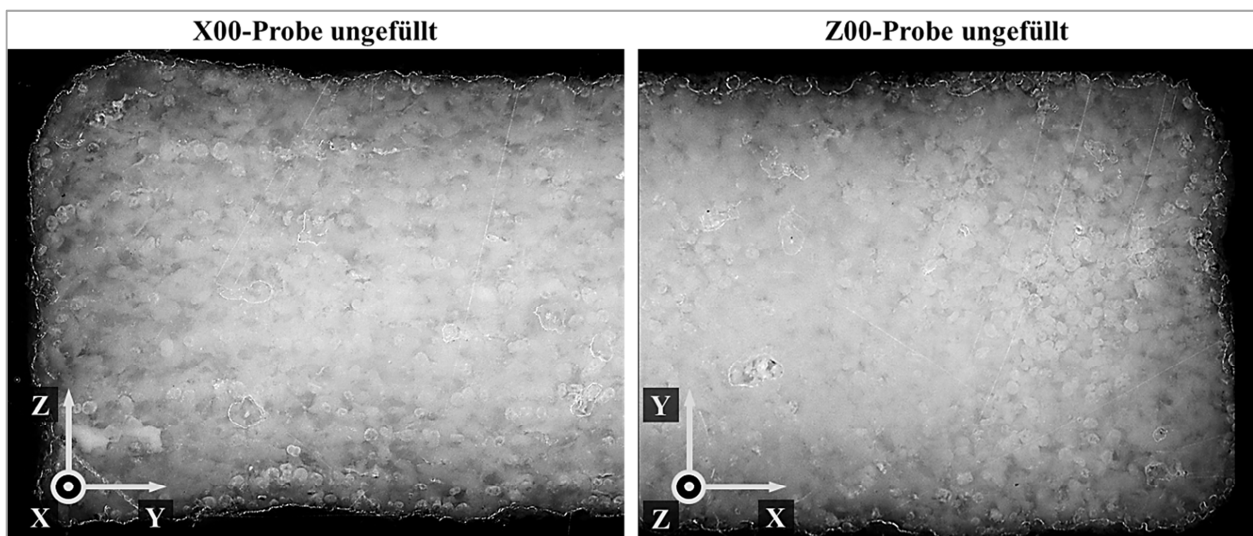


Abbildung 5.6: Schliffbilder von lasergesinterten Probestäben aus ungefülltem PA 12

Im luftfeuchten Zustand ist die Zugfestigkeit der glaskugelgefüllten X- und Y-Sinterproben erheblich geringer als die der ungefüllten Stäbe (siehe Tabelle 5.2 und Abbildung 5.7). Der Grund für den signifikanten Festigkeitsabfall muss eine Kombination aus Wasseraufnahme und dem Zusatz der Glaskugeln sein, da ein derartiger Rückgang nicht durch den Zusatz von Glaskugeln erklärbar ist. Dies belegen auch die zuvor dargestellten Ergebnisse der sinterfrischen Probestäbe sowie der direkte Vergleich mit den spritzgegossenen Stäben. Beim Spritzgussmaterial ist die prozentuale Veränderung der Zugfestigkeit im spritzfrischen und luftfeuchten Zustand nahezu identisch. Ein möglicher Grund für den starken Festigkeitsabfall der glaskugelgefüllten Sinterproben ist die feuchtigkeitsbedingte Veränderung der Grenzfläche zwischen Glaskugel und Polyamidmatrix. Der Einfluss der Wasseraufnahme wird in Abschnitt 5.3 detailliert analysiert, um den Grund für den hohen Festigkeitsabfall zu identifizieren. In Z-Richtung sind die Zugfestigkeit der ungefüllten und die der gefüllten Sinterproben fast gleich groß. Bei der Betrachtung der Spannungs-Dehnungs-Kurven der luftfeuchten Probestäbe (siehe Abbildung 5.7) wird allerdings erneut deutlich, dass die ungefüllten Stäbe frühzeitig und vor dem Erreichen der sonst in allen Kurvenverläufen erkennbaren Streckgrenze versagen.

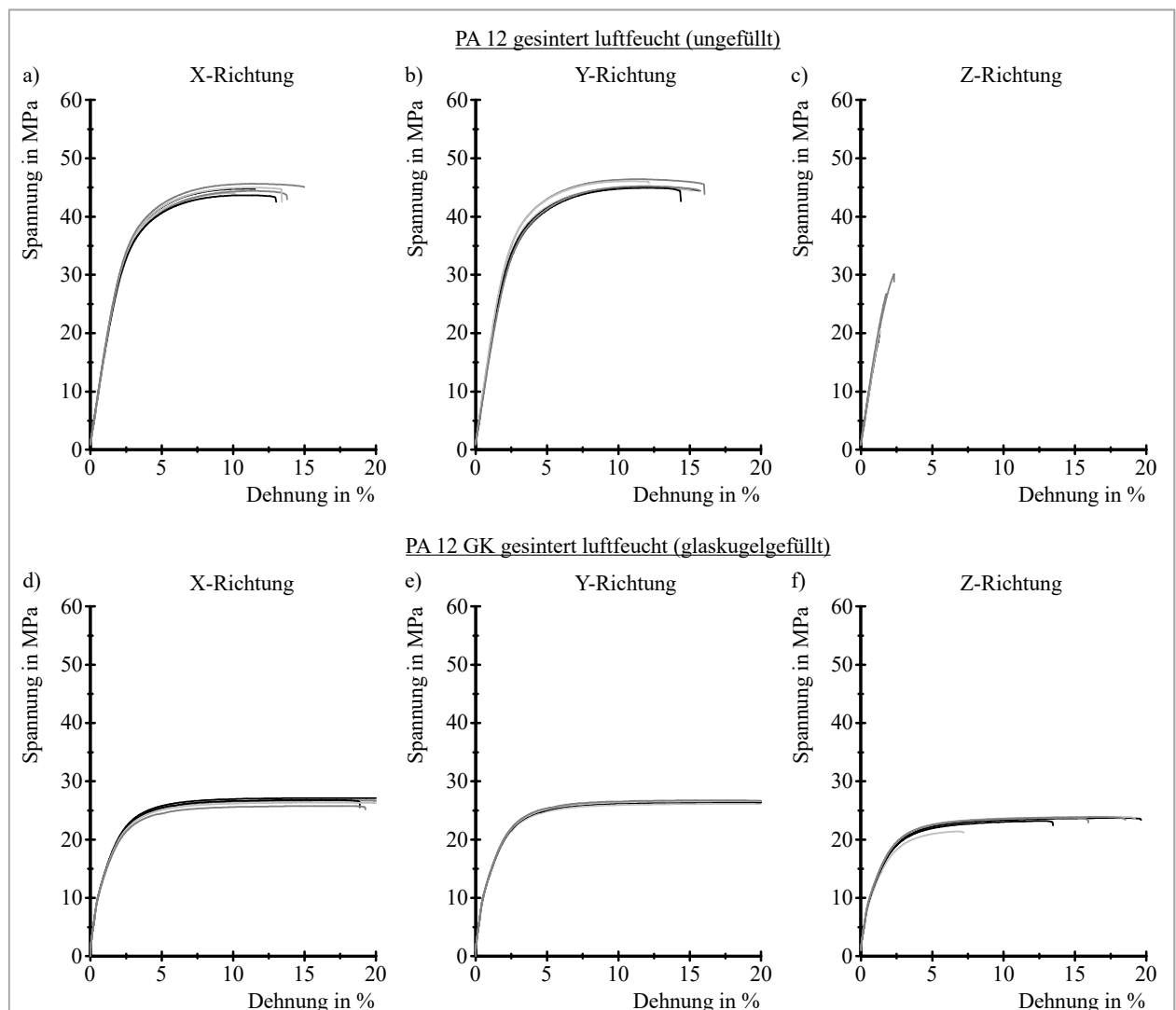


Abbildung 5.7: Spannungs-Dehnungs-Kurven von ungefülltem und glaskugelgefülltem PA 12-Sintermaterial, ermittelt an luftfeuchten Probestäben der Form 1BA mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 und 50 mm/min

Ein ähnliches Spannungs-Dehnungs-Verhalten haben bereits die ungefüllten, sinterfrischen Probestäbe gezeigt (siehe Abbildung 5.4). Der Grund hierfür sind wiederum die flächig im Inneren der Probestäbe angeordneten, nicht aufgeschmolzenen Pulverkörner (siehe Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6).

### 5.1.4 Einfluss der Glaskugeln auf die Streckdehnung/die Dehnung bei Zugfestigkeit

Die Versuchsergebnisse der spritzgegossenen Stäbe bestätigen die dehnungsbehindernde Wirkung der Glaskugeln. Im Vergleich zu den ungefüllten haben die gefüllten Stäbe sowohl im spritzfrischen als auch im luftfeuchten Zustand eine deutlich geringe Streckdehnung (siehe Tabelle 5.3). Die Versuchsergebnisse der Sinterproben hingegen sind nicht so eindeutig. Im sinterfrischen Zustand ist die Streckdehnung der glaskugelgefüllten Stäbe in X- und Y-Richtung erwartungsgemäß kleiner als die der ungefüllten Stäbe, wohingegen die Streckdehnung der gefüllten Stäbe in Z-Richtung ca. 30 % größer ist (siehe Abbildung 5.4). Dieser nicht zu erwartende Anstieg ist auf das vorzeitige Versagen der ungefüllten Z-Proben zurückzuführen.

Tabelle 5.3: Einfluss der Glaskugeln auf die Streckdehnung bzw. die Dehnung bei Zugfestigkeit von spritzgegossenem und lasergesintertem PA 12, Quellen der Datenblattkennwerte [11], [12], [107], [108], [109], [110], [111] und [112]

Material- bezeichnung	Gewichtsanteil Glaskugeln	Ver- arbeitung	Probe- stab	Prüf- geschw.	Richtung	trocken			luftfeucht			Quelle
						Streckdehnung/ Dehnung bei Zugfestigkeit	Standard- abweichung	proz. Verän- derung	Streckdehnung/ Dehnung bei Zugfestigkeit	Standard- abweichung	proz. Verän- derung	
	%			%								
Grilamid L 20 G	-	SG	k.A.	50	direkt	11	k.A.		12	k.A.		DB
Grilamid LKN 3H	30	SG	k.A.	50	direkt	8	k.A.	-27,3%	10	k.A.	-16,7%	DB
Grilamid LKN 5H	50	SG	k.A.	50	direkt	5	k.A.	-54,5%	7	k.A.	-41,7%	DB
Grilamid L 20 G	-	SG	1A	50	direkt	9,92	1,87		16,01	0,20		Versuch
Grilamid LKN 3H	30	SG	1A	50	direkt	8,21	0,45	-17,2%	13,03	0,16	-18,6%	Versuch
Grilamid LKN 5H	50	SG	1A	50	direkt	7,80	0,26	-21,3%	10,52	0,12	-34,3%	Versuch
PA 2200	-	SLS	k.A.	k.A.	X	k.A.	**	k.A.	k.A.	**	k.A.	DB
			k.A.	k.A.	Y	k.A.	**	k.A.	k.A.	**	k.A.	DB
			k.A.	k.A.	Z	k.A.	**	k.A.	k.A.	**	k.A.	DB
PA 3200 GF	40	SLS	k.A.	k.A.	X	k.A.	**	k.A.	k.A.	**	k.A.	DB
			k.A.	k.A.	Y	k.A.	**	k.A.	k.A.	**	k.A.	DB
			k.A.	k.A.	Z	k.A.	**	k.A.	k.A.	**	k.A.	DB
PA 2200	-	SLS	1BA	50	X	9,03	0,96		10,96	0,61		Versuch
			1BA		Y	9,21	0,39		11,65	1,54		Versuch
			1BA		Z	1,79	0,43		1,56	0,42		Versuch
PA 3200 GF	40	SLS	1BA	50	X	3,02	0,10	-66,6%	17,27	1,15	57,6%	Versuch
			1BA		Y	3,02	0,08	-67,2%	18,01	1,12	54,5%	Versuch
			1BA		Z	2,32	0,19	29,2%	15,86	2,22	916,5%	Versuch
SG	Spritzgießen											
SLS	Selektives Lasersintern											
DB	Datenblatt											
k.A.	keine Angabe											
**	im Datenblatt fehlt die Angabe des Konditionierungszustands											

Die Versuche mit den luftfeuchten Sinterproben ergeben für alle Raumrichtungen einen signifikanten Anstieg der Streckdehnung (siehe Tabelle 5.3 und Abbildung 5.7). Der Grund für dieses unerwartete Verhalten kann an dieser Stelle nicht abschließend geklärt werden. Die untypisch hohe Streckdehnung der glaskugelgefüllten Sinterproben ist höchstwahrscheinlich auf eine Kombination aus dem Einfluss der Wasseraufnahme und dem Zusatz der Glaskugeln zurückzuführen, da ein derartiges Verhalten grundsätzlich nicht durch den Zusatz von Glaskugeln zu erklären ist. Eine mögliche Erklärung ist wie bereits erwähnt die feuchtigkeitsbedingte Veränderung der Grenzfläche zwischen Glaskugel und Polyamidmatrix. Das deutlich duktilere Verhalten der luftfeuchten, glaskugelgefüllten Probestäbe ist in Abbildung 5.7 sehr gut zu sehen.

### 5.1.5 Bewertung der Untersuchung des Einflusses der Glaskugeln

Die Untersuchung des quantitativen Einflusses der Glaskugeln zeigt, dass sich nur die mechanischen Eigenschaften des Spritzgussmaterials durch den Zusatz der Glaskugeln in erwarteter Art und Weise verändern. Die Steifigkeit des Spritzgussmaterials steigt signifikant an und die Streckdehnung geht deutlich

zurück. Die Zugfestigkeit der glaskugelgefüllten Spritzgussmaterialien ist etwas höher als die des ungefüllten Werkstoffs. Die beschriebenen Effekte sind sowohl bei den spritzfrischen Probestäben als auch bei den luftfeuchten Zugproben vergleichbar stark ausgeprägt.

Das glaskugelgefüllte Sintermaterial hingegen verhält sich lediglich im sinterfrischen Zustand annähernd so wie erwartet. Der Elastizitätsmodul der glaskugelgefüllten Proben ist deutlich höher als der Modul der ungefüllten Sinterproben. Die Größenordnung des Steifigkeitsanstiegs passt zur prozentualen Veränderung des E-Moduls der spritzgegossenen Probestäbe, wenn die unterschiedlich hohen Füllgrade berücksichtigt werden. Auch die Dehnung bei Zugfestigkeit der glaskugelgefüllten X- und Y-Proben verändert sich im sinterfrischen Zustand wie erwartet. Sie ist geringer als die Dehnung bei Zugfestigkeit der ungefüllten Proben. Im luftfeuchten Zustand verhalten sich die glaskugelgefüllten Sinterproben allerdings anders als erwartet. Der Steifigkeitsanstieg ist zu gering und die Zugfestigkeit ist um ca. 40 % kleiner als die der gefüllten Stäbe. Auch der Einfluss der Glaskugeln auf die Dehnung bei Zugfestigkeit der luftfeuchten Sinterproben weicht deutlich vom zu erwartenden Ergebnis ab. Normalerweise haben glaskugelgefüllte Materialien eine geringere Dehnung bei Zugfestigkeit als ungefüllte. Beim luftfeuchten Sintermaterial ist die Dehnung bei Zugfestigkeit des gefüllten Materials jedoch um ca. 50 % größer als der entsprechende Kennwert des ungefüllten Sintermaterials. Das Verhalten der luftfeuchten Probestäbe ist nicht allein durch den Zusatz der Glaskugeln zu erklären. Der Grund für das unerwartete Verhalten muss eine Kombination aus dem Einfluss der Wasseraufnahme in Verbindung mit dem Zusatz der Glaskugeln sein. Der quantitative Einfluss der Wasseraufnahme und der Grund für die starke Beeinflussung der Kennwerte des glaskugelgefüllten Sintermaterials wird in Abschnitt 5.3 ausführlich diskutiert.

### **Diskussion der Unterschiede zwischen den Datenblattkennwerten und den eigenen Ergebnissen**

Der direkte Vergleich zwischen den Datenblattkennwerten und den Versuchsergebnissen der luftfeuchten Sinterproben (siehe Tabelle 10.1 im Anhang) zeigt insbesondere beim glaskugelgefüllten Sinterpolyamid wesentlich größere Abweichungen als der Vergleich zwischen den Datenblattkennwerten und den Untersuchungsergebnissen der sinterfrischen Probestäbe (siehe Tabelle 5.4).

Tabelle 5.4: Datenblattkennwerte und Versuchsergebnisse der sinterfrischen Probestäbe im direkten Vergleich

Materialbezeichnung			PA 2200 Balance 1.0				PA 3200 GF			
Material			PA 12				PA 12 GK 40			
Eigenschaft			ungefüllt				glasgefüllt			
Farbe			weißlich				weißlich			
			Datenblatt	Versuch		proz. Abweichung zw. Datenblatt und Versuch	Datenblatt	Versuch		proz. Abweichung zw. Datenblatt und Versuch
Probestab			k.A.	Form: 1BA, Dicke: 2 mm			k.A.	Form: 1BA, Dicke: 2 mm		
Konditionierungszustand			k.A.	<u>sinterfrisch</u>			k.A.	<u>sinterfrisch</u>		
Prüfgeschw. E-Modul			k.A.	1 mm/min			k.A.	1 mm/min		
Prüfgeschw. Rest der Prüfung			k.A.	50 mm/min			k.A.	50 mm/min		
Kennwert		Einheit	Kennwert	Messwert	Standardabweichung		Kennwert	Messwert	Standardabweichung	
E-Modul	X	N/mm²	1.650	1.758	101,09	6,5 %	3.200	3.198	77,66	-0,1 %
	Y	N/mm²	1.650	1.882	54,45	14,1 %	3.200	3.262	40,51	1,9 %
	Z	N/mm²	1.650	1.814	83,5	10,0 %	2.500	3.186	23,14	27,4 %
Zugfestigkeit	X	N/mm²	48,0	48,7	0,59	1,5 %	51,0	46,8	0,56	-8,2 %
	Y	N/mm²	48,0	49,3	0,34	2,7 %	51,0	48,6	0,41	-4,7 %
	Z	N/mm²	42,0	29,1	4,39	-30,7 %	47,0	44,1	1,09	-6,2 %
Bruchdehnung	X	%	18,0	11,2	1,191	-37,8 %	9,0	3,4	0,592	-61,9 %
	Y	%	18,0	11,4	0,506	-36,5 %	9,0	3,5	0,424	-61,2 %
	Z	%	4,0	1,9	0,536	-52,3 %	5,5	2,3	0,185	-57,9 %
Quelle:			EOS	eigene Untersuchungen			EOS	eigene Untersuchungen		

Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die vom Pulverhersteller bereitgestellten Kennwerte mithilfe von sinterfrischen Probestäben ermittelt wurden, und unterstützt die Aussage von Breuninger [22], dass sich die Datenblattkennwerte von Sintermaterialien üblicherweise auf einen trockenen Werkstoff beziehen. Zwischen den Datenblattkennwerten und den eigenen Untersuchungsergebnissen der sinterfrischen Probestäbe sind lediglich bei der Bruchdehnung und der Festigkeit des ungefüllten Materials in Z-Richtung größere Abweichungen vorhanden (siehe Tabelle 5.4).

Die ermittelten Zug-E-Moduln der sinterfrischen Probestäbe sind vergleichbar oder höher als die Datenblattkennwerte. Beim ungefüllten Sinterpulver entspricht die gemessene Zugfestigkeit in X- und Y-Richtung annähernd den bereitgestellten Kennwerten. In Z-Richtung existiert jedoch eine größere Abweichung von -30,7 %. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven dieser Versuche zeigen (siehe Abbildung 5.4), dass die ungefüllten Probestäbe versagt haben, bevor die Kurven das kunststofftypische, nicht linear viskoelastische Verhalten zeigen. Das vorzeitige Versagen der Z-Proben ist auf das Vorhandensein von nicht aufgeschmolzenen Pulverkörnern zurückzuführen (siehe Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6). Bei erwartungsgemäßem Kurvenverlauf wäre die Zugfestigkeit der ungefüllten Stäbe höher. Auf diese Weise kann der große Festigkeitsunterschied zwischen Datenblatt und Versuch in Z-Richtung erklärt werden.

Die gemessenen Bruchdehnungen liegen um 36,5 bis 61,9 % unter den angegebenen Kennwerten. Eine mögliche Erklärung für die großen Unterschiede bei der Bruchdehnung und die geringfügig höheren Moduln ist, dass der Pulverhersteller die Datenblattkennwerte weder mit sinterfrischen noch mit luftfeuchten Proben ermittelt hat. Feuchtigkeitsbeladene Proben haben grundsätzlich eine höhere Streck- bzw. Bruchdehnung und einen geringeren E-Modul. Die Verwendung von unvollständig gesättigten Proben zur Ermittlung der Datenblattkennwerte würde somit die gemessenen Abweichungen erklären. Des Weiteren ist es möglich, dass der Pulverhersteller eine geringere Prüfgeschwindigkeit verwendet hat. Bei Kunststoffen nehmen die zeitabhängigen nicht elastischen Verformungsanteile mit abnehmender Belastungsgeschwindigkeit zu. Dies hat zur Folge, dass der E-Modul und die Streckspannung sinken und dass die Bruchdehnung ansteigt [9]. Auch die Verwendung von unterschiedlich dicken Probestäben kann ein möglicher Grund für Abweichungen zwischen Messwert und Datenblatt sein. Die mechanischen Eigenschaften von Spritzgießteilen besitzen häufig eine Abhängigkeit von der Dicke des Probestabs. Ob dies bei lasergesintertem PA 12 ebenfalls der Fall und damit ein möglicher Grund für die gemessenen Abweichungen ist, wird in Abschnitt 5.5 analysiert. Die Ergebnisse zur Charakterisierung des Einflusses der Glaskugeln zeigen, dass eine gründliche Untersuchung der mechanischen Eigenschaften des Sintermaterials notwendig ist, bevor der quantitative Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften des Sinterpolyamids und eines vergleichbaren Spritzgusspolyamids untersucht werden kann. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Datenblattkennwerte nur als grobe Orientierung dienen können.

## 5.2 Charakterisierung des Einflusses der Ausrichtung im Herstellungsprozess

Die mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten und spritzgegossenen Kunststoffbauteilen sind in der Regel anisotrop. Aufgrund der unterschiedlichen Fertigungsverfahren (siehe Abschnitt 2.4) sind die Gründe für die richtungsabhängigen Eigenschaften ebenfalls unterschiedlich. Zur Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten und spritzgegossenen Bauteilen aus PA 12 GK ist es allerdings wichtig, die Ursache der anisotropen Eigenschaften zu verstehen und den Grad der Anisotropie zu kennen. Deshalb werden in diesem Abschnitt zunächst die Ursachen für die anisotropen Eigenschaften von Bauteilen, die durch Lasersintern bzw. Spritzgießen

hergestellt werden, erläutert. Anschließend wird die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 mithilfe von einachsigen Zugversuchen an unterschiedlich ausgerichteten Probestäben analysiert und diskutiert.

### 5.2.1 Charakterisierung der anisotropen Eigenschaften von Lasersinterbauteilen

Aufgrund ihres zeilen- bzw. schichtweisen Aufbaus verhalten sich lasergesinterte Bauteile anisotrop. Sie weisen in der Regel in Z-Richtung (Raumkoordinaten gemäß Abbildung 3.8) eine geringere Festigkeit und Steifigkeit auf als senkrecht dazu. Einer der Gründe hierfür ist der geringere Verschmelzungsgrad von aufeinanderfolgenden Schichten (siehe Unterabschnitt 3.4.2) [14] [27] [48]. Auch das Vorhandensein von nicht aufgeschmolzenen Pulverkörnern und Poren, die sich vorrangig zwischen zwei Schichten anlagern, führt zu geringeren mechanischen Eigenschaften in Z-Richtung (siehe Abbildung 5.8 und Abschnitt 2.6).

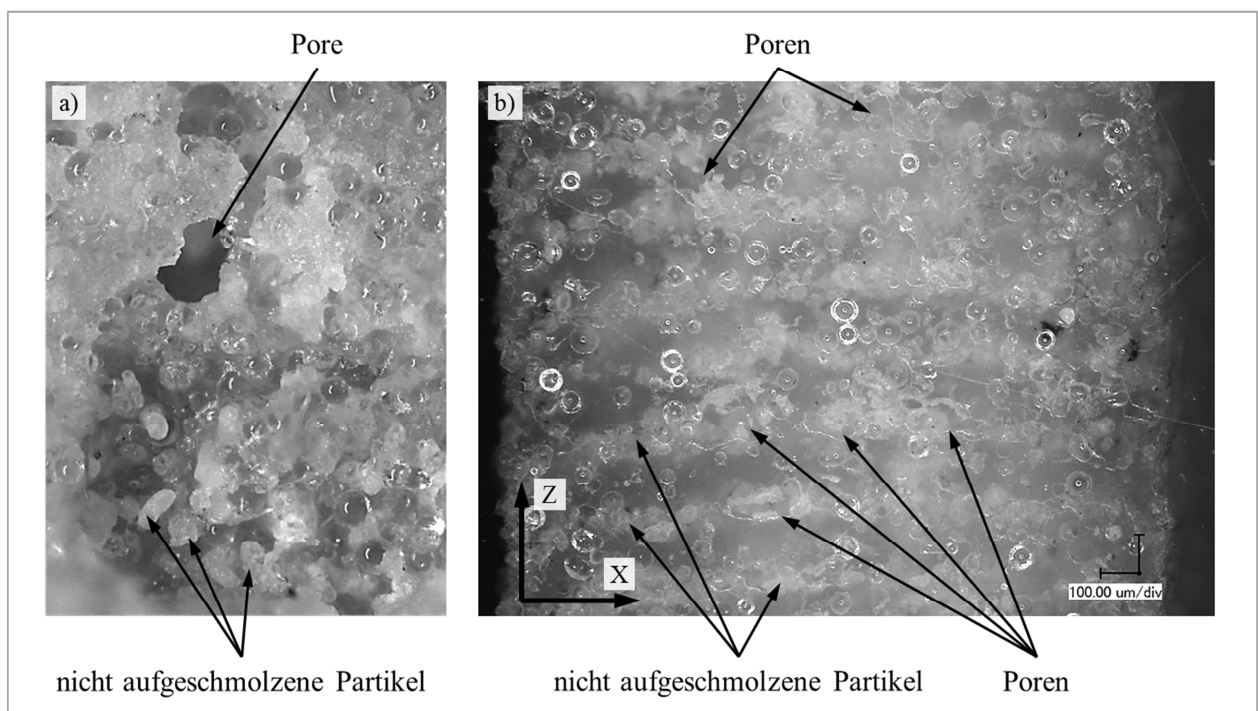


Abbildung 5.8: Bild a) Bruchfläche eines Probestabs mit deutlich ausgeprägter Pore und gut erkennbaren nicht aufgeschmolzenen Partikeln; Bild b) Schliffbild einer Z-Probe in Seitenansicht mit deutlich erkennbarem Schichtaufbau

Zusätzlich stellt die Grenze zwischen zwei Pulverschichten eine Grenze für wachsende Kristallite dar, was dazu führt, dass die Kristallbildung bevorzugt innerhalb einer Schicht stattfindet. Die Schichtgrenzen werden in der Regel nicht durch Kristallstrukturen überbrückt [13]. Je nach verwendeter Scanstrategie (siehe Unterabschnitt 3.4.3) können die mechanischen Kennwerte in X-, Y- und Z-Richtung voneinander abweichen. Die Anisotropie resultiert aus dem zeilen- bzw. schichtweisen Aufbau und ist von der Lage der Raumkoordinaten der Sinteranlage abhängig. Deshalb sind die mechanischen Eigenschaften von Sintermaterialien bezüglich dreier aufeinander senkrecht stehender Ebenen symmetrisch. Ein derartiges Materialverhalten wird orthotrop genannt [63]. Orthotropie ist ein Sonderfall der Anisotropie. Der Begriff orthotrop setzt sich aus den Wörtern orthogonal und anisotrop zusammen [126].

In Unterabschnitt 3.4.3 wurde erläutert, dass die Richtungsabhängigkeit der mechanischen Kennwerte durch die Verwendung der Kreuz-Strategie verringert werden kann, da mithilfe dieser Scanstrategie in X- und Y-Richtung vergleichbare mechanische Eigenschaften erzielt werden. Das gesinterte Bauteil besitzt



dann eine Ebene, innerhalb derer die Elastizitätseigenschaften isotrop sind. Bei mit der Kreuz-Strategie gesinterten Kunststoffteilen ist dies die XY-Ebene. Senkrecht zu dieser Ebene weist das gesinterte Bauteil allerdings weiterhin andere mechanische Eigenschaften auf. Ein derartiges Werkstoffverhalten wird transversal-isotrop genannt [63] [127]. Die transversale Isotropie ist wiederum ein Spezialfall der Orthotropie. Bei transversal-isotropen Materialien existiert eine Achse, um die sie gedreht werden können, ohne dass sich ihre Elastizitätseigenschaften ändern [126]. Bei lasergesinterten Kunststoffen ist dies die Z-Achse. Auch für lasergesinterte Metallbauteile wird in der Regel eine transversale Isotropie der Festigkeitswerte angenommen [128].

### 5.2.2 Charakterisierung der anisotropen Eigenschaften von Spritzgießbauteilen

Die mechanischen Eigenschaften und die Qualität von Spritzgießteilen werden bei gleichem Material maßgeblich durch die Fließvorgänge im Werkzeug beeinflusst [79]. Während der Formfüllung bestehen im Spritzgussprozess große Temperatur-, Druck-, Viskositäts- und Geschwindigkeitsunterschiede innerhalb der Kunststoffschmelze. An der Kavität, die trotz Werkzeugtemperierung wesentlich kälter als die Schmelze ist, haftet die Schmelze an und erstarrt aufgrund der hohen Abkühlgeschwindigkeit weitestgehend amorph. Zur Kanalmitte hin fließt die Schmelze mit weiterhin hoher Temperatur und erhöhter Geschwindigkeit sowie abnehmender Viskosität (Geschwindigkeitsprofil in Bild a) der Abbildung 5.9) [9].

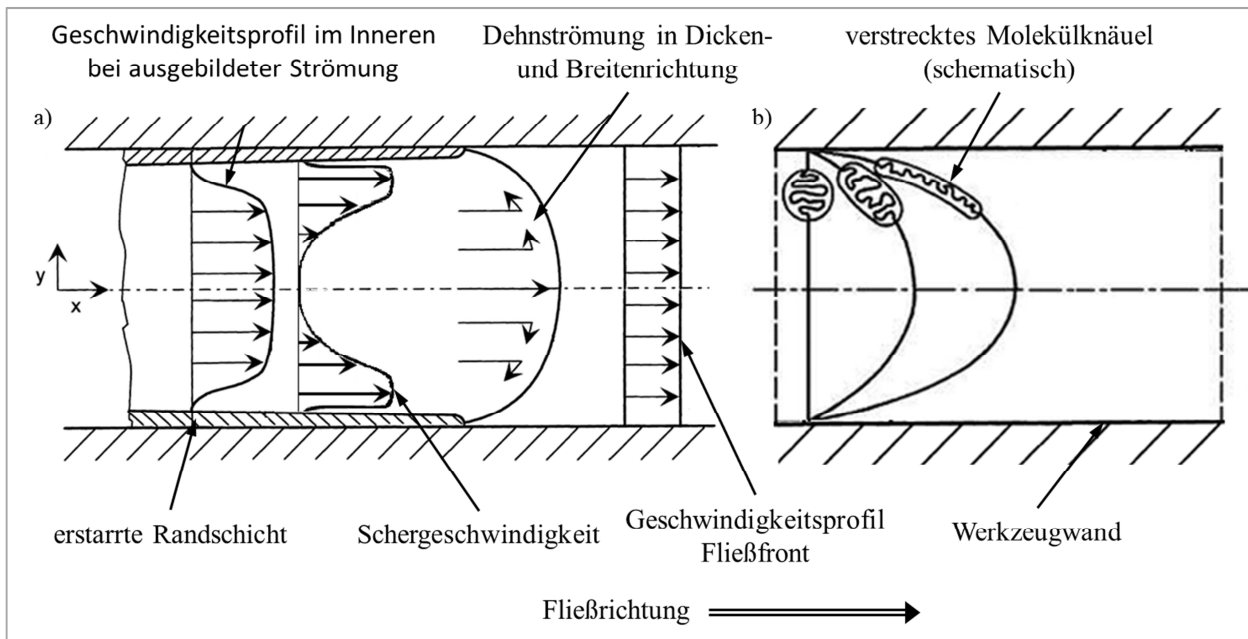


Abbildung 5.9: Bild a) Geschwindigkeitsprofil und Scherrate in einer Rohrströmung;  
Bild b) Aus den Scherströmungen resultierende Verstreckung der Molekülknäuel gemäß [79] [114] [129]

Bei der Betrachtung der Fließvorgänge muss grundsätzlich zwischen dem Geschwindigkeitsprofil im Inneren des Stroms und der Fließfrontgeschwindigkeit unterschieden werden. Die Geschwindigkeit der Fließfront ist über den Kanalquerschnitt konstant, das Geschwindigkeitsprofil im Inneren des Stroms nicht. Der höchste Gradient im Geschwindigkeitsprofil entsteht zwischen der strömenden Schmelze und der stationären Kavitätswand bzw. der erstarrten Randschicht. An dieser Stelle wird die Schmelze stark geschert (Schergeschwindigkeit in Bild a) der Abbildung 5.9). Die erstarrte Randschicht verengt den Strömungskanal, was dazu führt, dass das Maximum des Geschwindigkeitsprofils in diesem Bereich größer ist als die Geschwindigkeit der Fließfront. Die Schmelzeteilchen mit erhöhter Strömungsgeschwindigkeit holen die Fließfront ein und verursachen eine Dehnströmung in Dicken- und Breitenrichtung

(Dehngeschwindigkeit in Bild a) der Abbildung 5.9) [79]. Dehnströmungen entstehen auch, wenn sich eine Fließfront, wie beispielsweise bei einer mittig angespritzten, runden Platte, ausdehnt. Sowohl Scher- als auch Dehnströmungen führen zur Ausrichtung der Polymermolekülketten. In welcher Richtung sich die Molekülketten und eventuell vorhandene Füllstoffe ausrichten, ist von der dominierenden Strömungsart abhängig. Durch Scherströmungen werden die Ketten in Fließrichtung und durch Dehnströmungen quer zur Fließrichtung orientiert [129]. Bei spritzgegossenen Platten mit Filmanguss (siehe Abbildung 5.10), so wie sie im Rahmen dieser Dissertation zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften verwendet werden, wirken Scherströmungen insbesondere im rand- und oberflächennahen Bereich und Dehnströmungen im Inneren der Platte. Grundsätzlich führen Dehnströmungen zu einer etwa 100-mal stärkeren Molekülorientierung als Scherströmungen [53]. Die Höhe der Scherung an der Werkzeugwand und die Dehnung im Kernbereich sind von der Bauteildicke, der Viskosität und der Fließfrontgeschwindigkeit abhängig. Dünne Wanddicken und hohe Viskositäten führen zu einer Erhöhung der Scherkräfte [114] [129]. Bedingt durch die unterschiedlichen Strömungsverhältnisse werden die Molekülknäuel in der Schmelze deformiert und verstreckt [9]. Die verstreckten Molekülketten streben jedoch einen ungeordneten Zustand an, deshalb relaxieren die Ketten, solange ihre Beweglichkeit in der Schmelze groß genug ist. Der Anteil an orientierten Molekülketten wird demzufolge maßgeblich von der Abkühlgeschwindigkeit beeinflusst. Bei hoher Abkühlgeschwindigkeit friert ein hoher Teil der orientierten Moleküle ein und bleibt verstreckt [114]. Die starke Schergeschwindigkeit, die in unmittelbarer Nähe zur eingefrorenen Randschicht entsteht, wenn die Schmelze an der feststehenden Werkzeugwand bzw. der bereits erstarrten Randschicht haftend strömt, richtet die Makromoleküle in Fließrichtung aus (Bild b) der Abbildung 5.9). Der Grad der Orientierung ist eng mit der Schergeschwindigkeitsverteilung verknüpft [53] [129]. Die Dicke der hoch orientierten Schicht und insbesondere ihr Anteil an der gesamten Querschnittsfläche beeinflusst die mechanischen Eigenschaften von Spritzgießbauteilen maßgeblich [114]. Grundsätzlich sind die mechanischen Eigenschaften von teilkristallinen Thermoplasten weniger empfindlich gegenüber Molekülorientierungen als die von amorphen Kunststoffen [9].

Die strömungsinduzierte Orientierung von Molekülketten und eventuell vorhandenen, nicht isometrischen Füllstoffen führt zu anisotropen Werkstoffeigenschaften. Somit sind die anisotropen Eigenschaften von Spritzgießbauteilen im Gegenteil zu denen von lasergesinterten Kunststoffbauteilen nicht von der Lage der Raumkoordinaten der Fertigungsanlage bzw. der Orientierung des Bauteils im Fertigungsprozess abhängig, sondern von den lokalen Strömungsverhältnissen während der Formfüllung. Zur Untersuchung der richtungsabhängigen Eigenschaften der Spritzgusswerkstoffe werden im Rahmen der vorliegenden Dissertation Zugproben verwendet, die unter verschiedenen Winkeln aus einer Platte mit Filmanguss herausgefräst werden (siehe Abbildung 5.10). Vorzugsorientierungen von Molekülen und Füllstoffen können das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von spritzgegossenen Prüfkörpern erheblich beeinflussen. Dies gilt insbesondere für faserverstärkte Materialien. Beim Vergleich von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen muss deshalb immer die Herstellung der Prüfkörper beachtet werden. Direkt gespritzte Probekörper aus glasfasergefülltem Material haben beispielsweise eine höhere Zugfestigkeit als Proben, die durch indirekte Formgebung aus spritzgegossenen Platten hergestellt werden. Der Grund hierfür ist die Anzahl von in Spritzrichtung orientierten Fasern. Sie ist bei direkt gespritzten Probestäben am größten (siehe Kurve 1 in Abbildung 5.10). In einer Platte ist der Faserorientierungsgrad in Fließrichtung etwas geringer als bei einem direkt gespritzten Probestab, jedoch existiert trotzdem ein deutlicher Unterschied im Spannungs-Dehnungs-Verhalten zwischen den längs und quer zur Spritzrichtung herausgetrennten Probestäben (siehe Kurve 2 und 3 in Abbildung 5.10) [117]. Zur Modellierung des Materialverhaltens von faserverstärkten Spritzgusswerkstoffen werden in der Regel orthotrope oder transversal-isotrope

Werkstoffmodelle verwendet. Zur Erstellung eines derartigen Materialmodells werden die mechanischen Kennwerte in und quer zur Faserausrichtung benötigt [2].

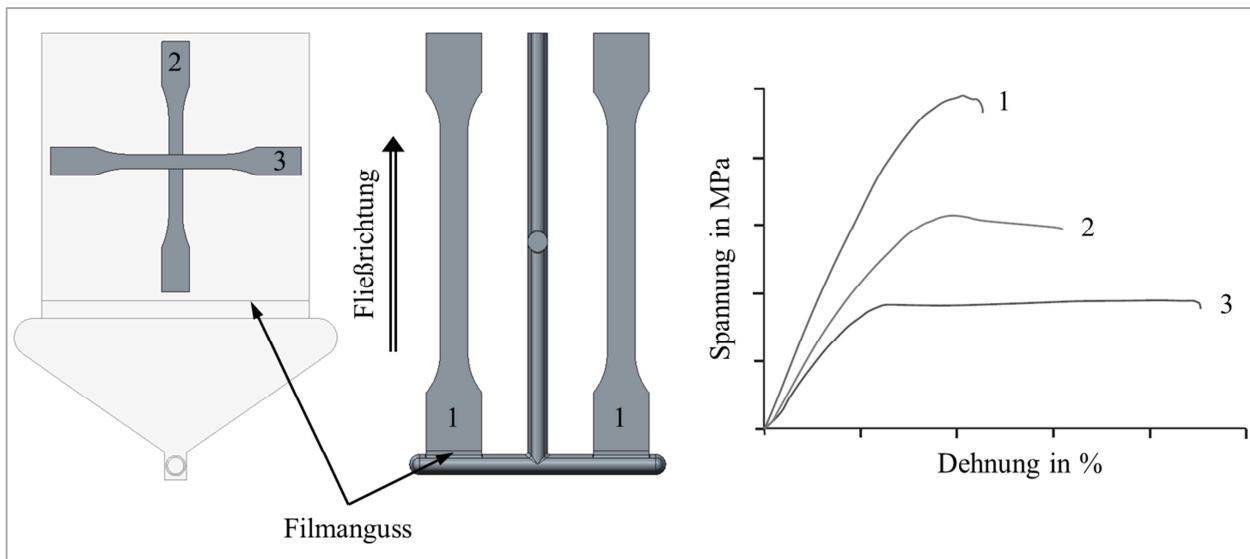


Abbildung 5.10: Spannungs-Dehnungs-Diagramme von PA 6 mit 30 % GF für direkt gespritzte Prüfkörper (1), in Fließrichtung aus einer Platte herausgefräste (2) und quer zur Fließrichtung herausgetrennte Probestäbe (3) gemäß [117]

Die mechanischen Eigenschaften von ungefüllten Thermoplasten sind in der Regel nicht oder nur geringfügig anisotrop, da es keinen Füllstoff gibt, der in eine Vorzugsorientierung ausgerichtet werden kann. Lediglich die Ausrichtung der Molekülketten kann bei ungefüllten Thermoplasten zu anisotropen Eigenschaften führen. Gleiches gilt für glaskugelgefüllte Thermoplaste, die im Rahmen dieser Dissertation betrachtet werden. Kugeln besitzen aufgrund ihrer isometrischen Form ein Aspektverhältnis von eins und können deshalb nicht in eine Vorzugsrichtung orientiert werden. Aufgrund dessen führt der Zusatz isometrischer Füllstoffe, wie z. B. Glaskugeln, nicht zu anisotropen Werkstoffeigenschaften [53]. Das Aspektverhältnis ( $a$ ) ist der Quotient aus Länge ( $l$ ) zu Durchmesser ( $d$ ) eines Füllstoffpartikels [130].

### 5.2.3 Systematik zur Untersuchung der anisotropen Eigenschaften

Alle Sinterteile, die im Rahmen dieser Arbeit analysiert werden, werden mithilfe der Kreuz-Strategie hergestellt (siehe Abschnitt 4.1). Die Datenblattkennwerte des Pulverherstellers deuten ebenfalls auf die Verwendung der Kreuz-Strategie hin, da in X- und Y-Richtung gleiche Kennwerte angegeben sind (siehe Tabelle 5.4 auf Seite 81). Die Richtungsabhängigkeit der mechanischen Kennwerte von glaskugelgefülltem Sinterpolyamid in X- und Y-Richtung bei Verwendung der Kreuz-Strategie wird nachfolgend analysiert, da bisherige Untersuchungen (siehe Unterabschnitt 3.4.3) lediglich den Einfluss der Scanstrategie für ungefülltes PA 12 charakterisiert haben. Die Analyse der richtungsabhängigen Eigenschaften des gefüllten Sinterpolyamids erfolgt in zwei Schritten. Als Erstes wird in Unterabschnitt 5.2.4 das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von lasergesinterten Probestäben untersucht, die während des Sinterprozesses flach in der XY-Ebene orientiert waren, um die Annahme, dass die mechanischen Eigenschaften in dieser Ebene isotrop sind, zu überprüfen. Zusätzlich werden die anisotropen Eigenschaften des glaskugelgefüllten Sinterwerkstoffs mit denen eines ungefüllten Sinterpolyamids verglichen. Im zweiten Schritt erfolgt in Unterabschnitt 5.2.5 die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Sinterpolyamiden im dreidimensionalen Raum, um die zuvor als transversal-isotrop beschriebenen Eigenschaften von lasergesinterten Kunststoffbauteilen, die mithilfe der Kreuzstrategie hergestellt werden, vollständig zu beschrei-

ben. Zusätzlich werden in Unterabschnitt 5.2.7 die richtungsabhängigen Eigenschaften der beiden glaskugelgefüllten Spritzgussmaterialien aus Tabelle 4.2 (siehe Seite 61) untersucht, um den Einfluss einer möglichen Ausrichtung der Molekülketten zu charakterisieren. Für die Zugversuche werden Probestäbe verwendet, die unter verschiedenen Winkeln aus einer spritzgegossenen Platte herausgetrennt wurden. Des Weiteren erfolgt in diesem Unterabschnitt ein direkter Vergleich der anisotropen Eigenschaften von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben aus PA 12 GK.

#### 5.2.4 Mechanische Eigenschaften von Sinterpolyamiden in der XY-Ebene

Kaddar [71] und Sauer [86] haben den Einfluss der Scanstrategie für ungefülltes PA 12 analysiert und festgestellt, dass die Verwendung der Kreuz-Strategie in X- und Y-Richtung zu annähernd gleichen mechanischen Eigenschaften führt (siehe Unterabschnitt 3.4.3). Ob sich dieses Ergebnis auch auf glaskugelgefülltes PA 12 übertragen lässt, wird nachfolgend überprüft. In Abbildung 5.11 sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven der X- und Y-Proben von zwei verschiedenen Sinterexperten dargestellt.

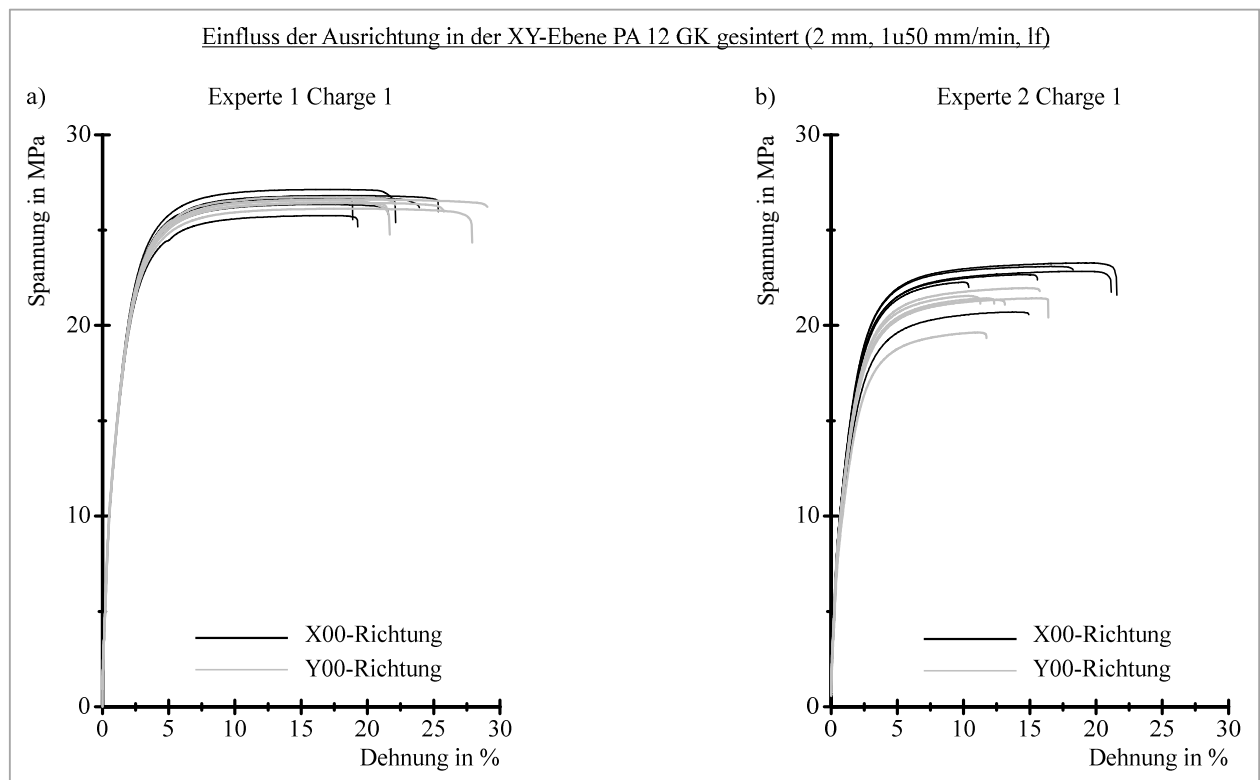


Abbildung 5.11: Spannungs-Dehnungs-Kurven von 2 mm dicken Sinterproben aus PA 12 GK; ermittelt an luftfeuchten Probestäben mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 und 50 mm/min

Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme zeigen, dass die Kurven für die Raumrichtungen X und Y einen annähernd gleichen Verlauf aufweisen. Insbesondere die Sinterproben von EXP\_1 aus Charge 1 (CH\_1) zeigen fast identisches Verhalten in X- und Y-Richtung (Bild a) in Abbildung 5.11). Diese Untersuchung zeigt, dass die Verwendung der Kreuz-Strategie auch bei glaskugelgefülltem PA 12 dazu führt, dass die mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten Probestäben, deren Längsachse während des Fertiigungsprozesses in X- bzw. Y-Richtung ausgerichtet ist, vergleichbar sind.

Die Proben des zweiten Sinterexperten streuen insgesamt etwas stärker. Des Weiteren ist zu sehen, dass die Zugfestigkeit der Y-Proben von EXP\_2 tendenziell etwas geringer als die der X-Proben ist. Zur Untersuchung der geringeren mechanischen Eigenschaften und der größeren Streuung der Spannungs-

Dehnungs-Kurven der Sinterproben von EXP\_2 werden nachfolgend sowohl die Bruchflächen als auch die Schlißflächen ausgewählter Probestäbe analysiert, bevor im Anschluss daran der Einfluss der Ausrichtung der Probe innerhalb der XY-Ebene auf die Kennwerte Zug-E-Modul, Zugfestigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit ausführlich diskutiert wird.

### Mikroskopische Untersuchung der Bruch- und Schlißflächen

Der direkte Vergleich in Abbildung 5.12 zeigt, dass die Bruchfläche der glaskugelgefüllten X-Probe von EXP\_1 aus CH\_1 (Bild a) in Abbildung 5.12) wesentlich einheitlicher ist als die der X-Probe von EXP\_2 aus CH\_1 (Bild b) in Abbildung 5.12). Darüber hinaus sind auf der Bruchfläche der Probe von EXP\_1 deutlich weniger Poren zu erkennen. Das Vorhandensein von Poren hat grundsätzlich negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten Bauteilen, da Poren den tragenden Querschnitt schwächen und innere Kerben verursachen (siehe Unterabschnitt 2.6.2).

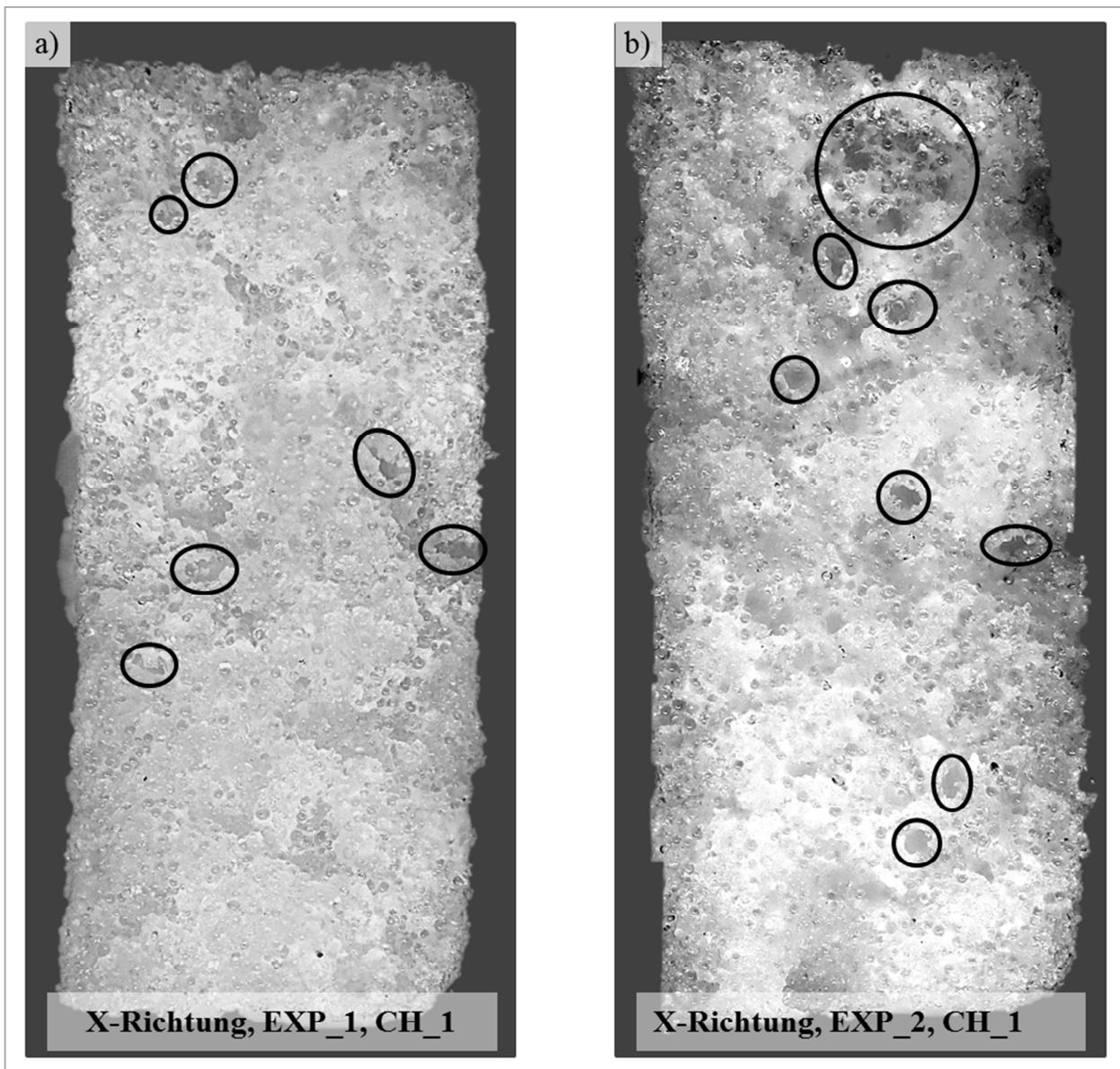


Abbildung 5.12: Bruchflächen von X-Proben von EXP\_1 und EXP\_2 jeweils aus CH\_1

In den Schlißbildern der X- und Z-Proben (siehe Abbildung 5.13 und Abbildung 5.14) sind die Poren zusätzlich durch eine schwarze Umrandung gekennzeichnet. Die Aufnahmen zeigen ebenfalls, dass die Proben von EXP\_2 deutlich mehr Poren aufweisen als die Stäbe von EXP\_1.

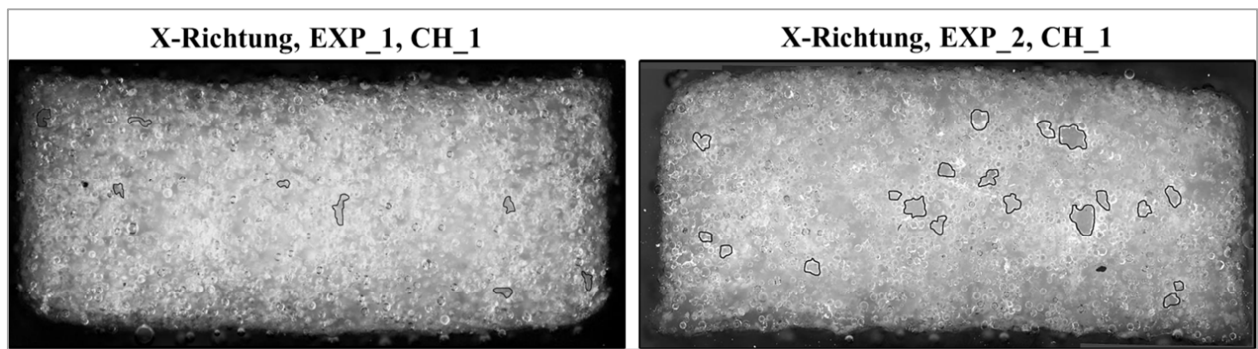


Abbildung 5.13: Schliffbilder der X-Proben von EXP\_1 und EXP\_2 jeweils aus Charge 1

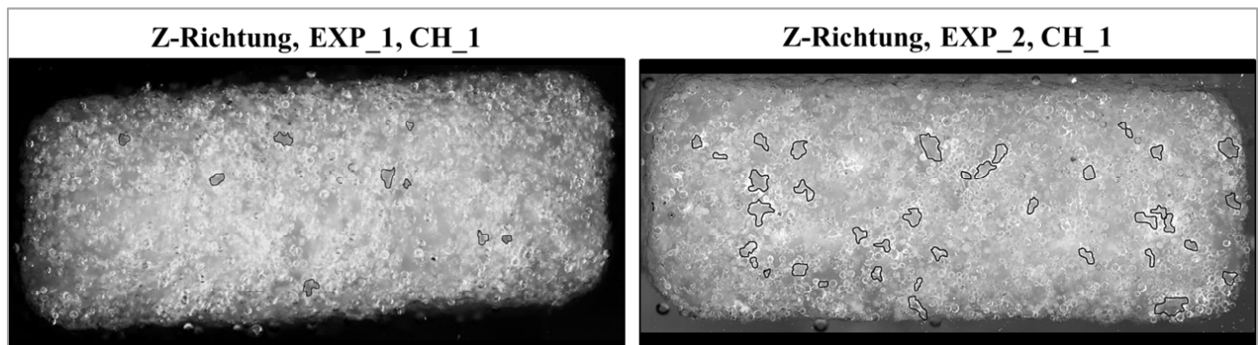


Abbildung 5.14: Schliffbilder der Z-Proben von EXP\_1 und EXP\_2 jeweils aus Charge 1

Insbesondere auf der Schlifffläche der Z-Probe von EXP\_2 (siehe Abbildung 5.14 rechts) sind sehr viele Poren zu erkennen. Der erhöhte Porenanteil erklärt zum einen die größere Streuung der Spannungs-Dehnungs-Kurven und zum anderen die niedrigeren mechanischen Eigenschaften der Probestäbe von EXP\_2.

### **Quantitative Beeinflussung der mechanischen Kennwerte durch die Ausrichtung in der XY-Ebene**

Nachfolgend werden die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen hinsichtlich der quantitativen Beeinflussung von E-Modul, Zugfestigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit analysiert. Der Einfluss der Ausrichtung der Probestäbe in der XY-Ebene wird für unterschiedlich dicke Prüfkörper, zwei Prüfungsgeschwindigkeiten und zwei Konditionierungszustände quantifiziert.

### **Einfluss der Ausrichtung in der XY-Ebene auf den Zug-E-Modul**

Abbildung 5.15 zeigt die prozentuale Änderung des E-Moduls von in Y-Richtung orientierten Probestäben, die mithilfe der Kreuz-Strategie hergestellt wurden. Als Bezugsgröße wird der E-Modul in X-Richtung verwendet. In dem Diagramm und in allen nachfolgenden Diagrammen dieser Art ist die prozentuale Veränderung des arithmetischen Mittelwerts der betrachteten Versuchsreihen dargestellt. Auf die Eintragung der Standardabweichung wird bei diesem Diagrammtyp zugunsten der besseren Übersicht verzichtet. Die jeweiligen Kennwerte mit der dazugehörigen Standardabweichung befinden sich im Anhang dieser Arbeit.

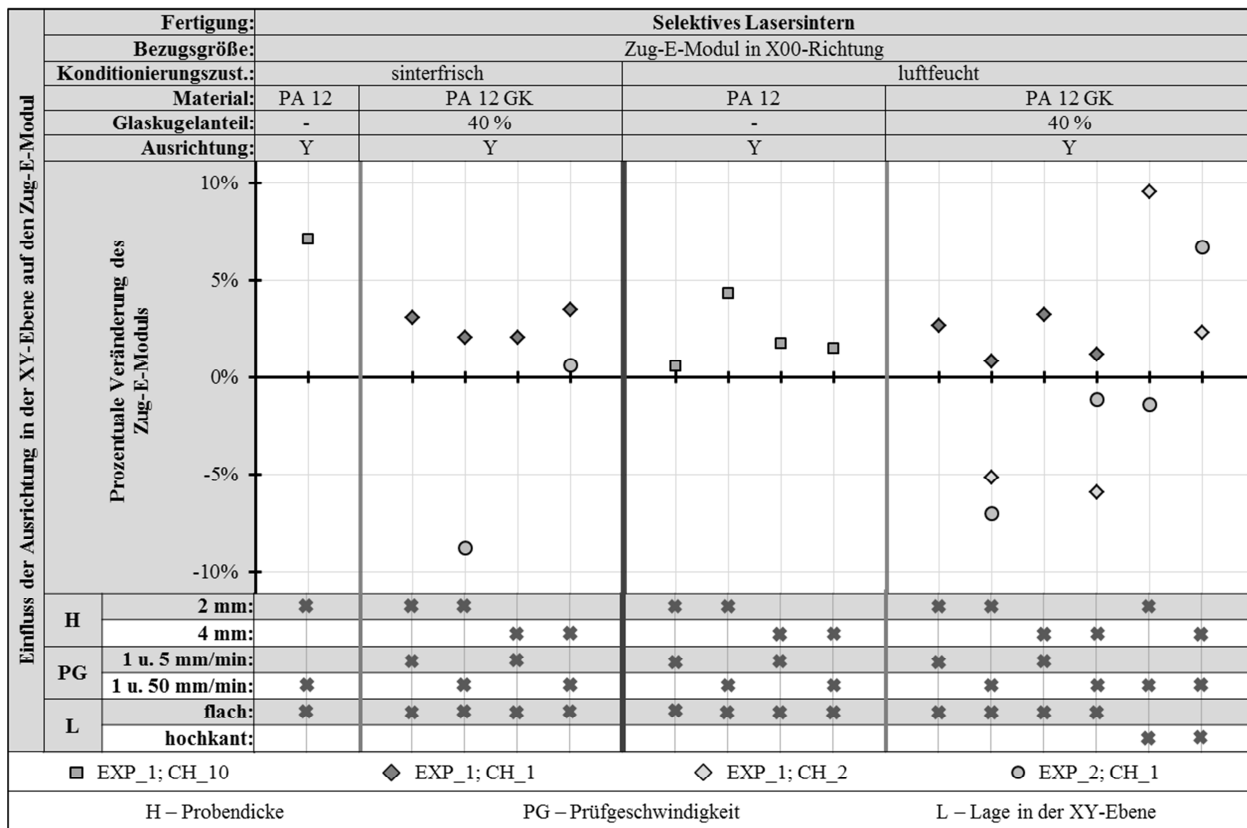


Abbildung 5.15: Einfluss der Ausrichtung des Probestabs in der XY-Ebene auf den Zug-E-Modul von lasergesinterten Probestäben aus ungefülltem und glaskugelgefülltem PA 12

Die grafische Auswertung verdeutlicht, dass der Zug-E-Modul in X- und Y-Richtung bei gleicher Prüfgeschwindigkeit und gleichem Konditionierungszustand etwa gleich groß ist. Die prozentuale Veränderung liegt für alle Versuchsreihen im einstelligen Prozentbereich. Insbesondere die Versuchsergebnisse der Proben von EXP\_1 aus CH\_1 liegen sehr nah zusammen. Die Streuung dieser Versuchsreihen liegt zwischen +0,8 und +3,5 %. Auch die ungefüllten Stäbe von EXP\_1 haben im luftfeuchten Zustand eine sehr geringe Streuung. Die Stäbe aus CH\_2 von EXP\_1 und die Proben von EXP\_2 streuen im Vergleich dazu etwas stärker. Anhand der Untersuchungsergebnisse ist keine systematische Beeinflussung des E-Moduls zu erkennen, die auf die Ausrichtung der Probestäbe während des Sinterprozesses zurückzuführen ist. Da keine Richtungsabhängigkeit des E-Moduls innerhalb der XY-Ebene feststellbar ist, kann er als isotrop angesehen werden.

### Einfluss der Ausrichtung in der XY-Ebene auf die Zugfestigkeit

Abbildung 5.16 zeigt die prozentuale Veränderung der Zugfestigkeit von in X- und Y-Richtung orientierten Probestäben. Die gemessenen Festigkeitswerte unterscheiden sich nur gering voneinander. Die prozentuale Veränderung der Zugfestigkeit liegt in allen Versuchsreihen, wie schon bei der Auswertung des E-Moduls, im einstelligen Prozentbereich. Im sinterfrischen Zustand ist die Festigkeit der Y-Proben etwas höher als die der X-Stäbe. Im luftfeuchten Zustand ist keine eindeutige Tendenz zu erkennen, die auf die Ausrichtung der Probestäbe zurückzuführen ist. Auch zwischen den gefüllten und den ungefüllten Stäben gibt es keinen nennenswerten Unterschied. Die Versuchsreihen der ungefüllten Stäbe liegen sogar noch näher beieinander als die der glaskugelgefüllten.

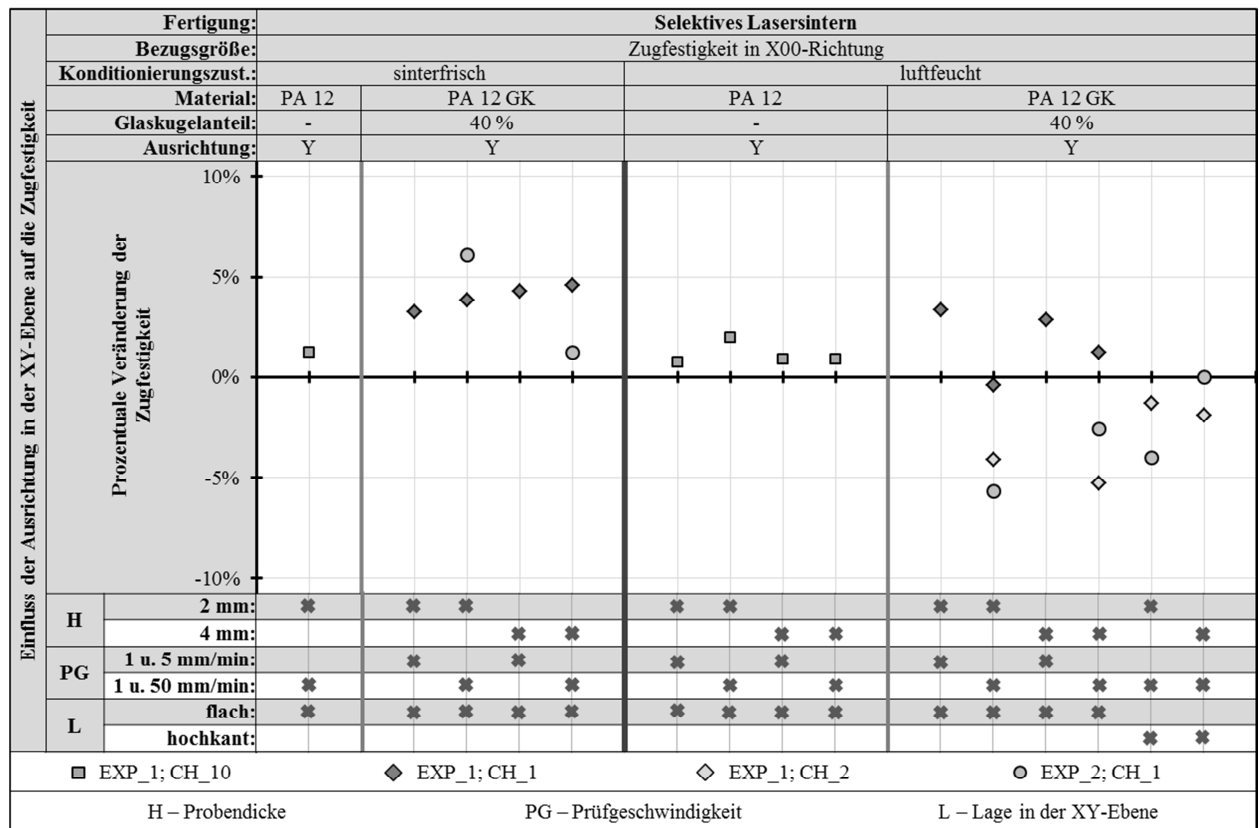


Abbildung 5.16: Einfluss der Ausrichtung des Probestabs in der XY-Ebene auf die Zugfestigkeit von lasergesinterten Probestäben aus ungefülltem und glaskugelgefülltem PA 12

### Einfluss der Ausrichtung in der XY-Ebene auf die Dehnung bei Zugfestigkeit

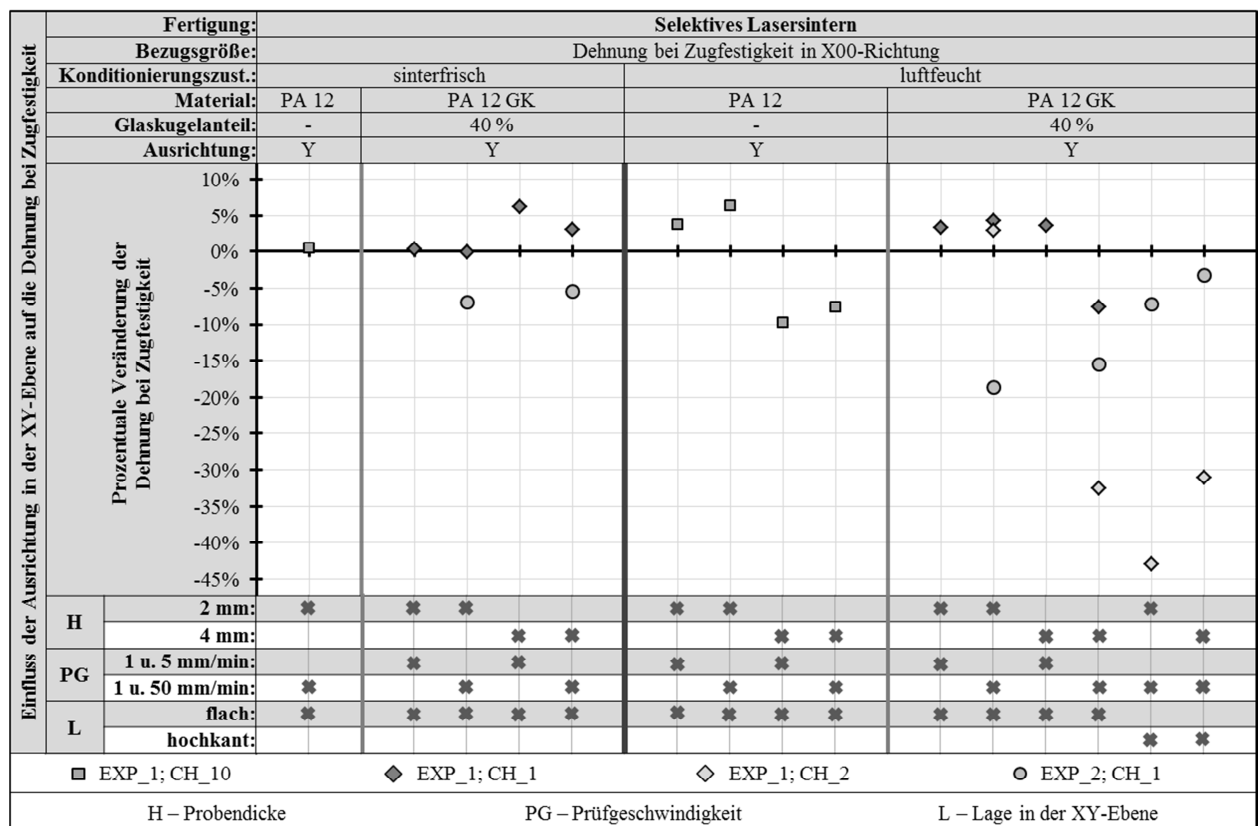


Abbildung 5.17: Einfluss der Ausrichtung des Probestabs in der XY-Ebene auf die Dehnung bei Zugfestigkeit von lasergesinterten Probestäben aus ungefülltem und glaskugelgefülltem PA 12



Die prozentuale Veränderung der Dehnung bei Zugfestigkeit zeigt ebenfalls keine eindeutige Tendenz, die auf die Orientierung der Probestäbe in der XY-Ebene zurückzuführen ist (siehe Abbildung 5.17). Die Streuung der Ergebnisse ist insgesamt etwas größer als beim E-Modul und der Zugfestigkeit. In allen Versuchen liegt die Veränderung der Dehnung bei Zugfestigkeit zwischen -42,9 und +6,3 %. Die Versuche an gefüllten und ungefüllten Stäben ergeben vergleichbare Ergebnisse. Auffällig ist, dass die Ergebnisse der Versuchsreihen mit den Stäben aus CH\_2 von EXP\_1 relativ deutlich von den restlichen Ergebnissen abweichen. Ohne diese Versuche liegen alle Versuchsreihen zur Ermittlung des Einflusses der Ausrichtung in der XY-Ebene auf die Dehnung bei Zugfestigkeit zwischen -18,7 und +6,3 %. Der Grund für die starken Abweichungen der Probestäbe von EXP\_1 aus CH\_2 wird in Unterabschnitt 5.2.5 analysiert.

### 5.2.5 Mechanische Eigenschaften von Sinterpolyamiden im dreidimensionalen Raum

Im Lasersinterprozess wird die Bauteilgeometrie durch das Hinzufügen von Material hergestellt (siehe Abschnitt 2.3.1). Aufgrund der schichtweisen Herstellung weichen die mechanischen Eigenschaften in Baurichtung von denen in X- und Y-Richtung ab. Diese Beeinflussung durch den Herstellungsprozess wurde für ungefülltes PA 12 bereits mehrfach untersucht (siehe Unterabschnitt 2.6.3). Nachfolgend werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung des Einflusses der schichtweisen Herstellung von lasergesinterten Probestäben aus glaskugelgefülltem PA 12 ausführlich diskutiert. Abbildung 5.18 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Kurven von in X-, Y- und Z-Richtung orientierten Probestäben aus PA 12 GK. Die Proben wurden von zwei unterschiedlichen Sinterexperten gefertigt und im luftfeuchten Zustand geprüft.

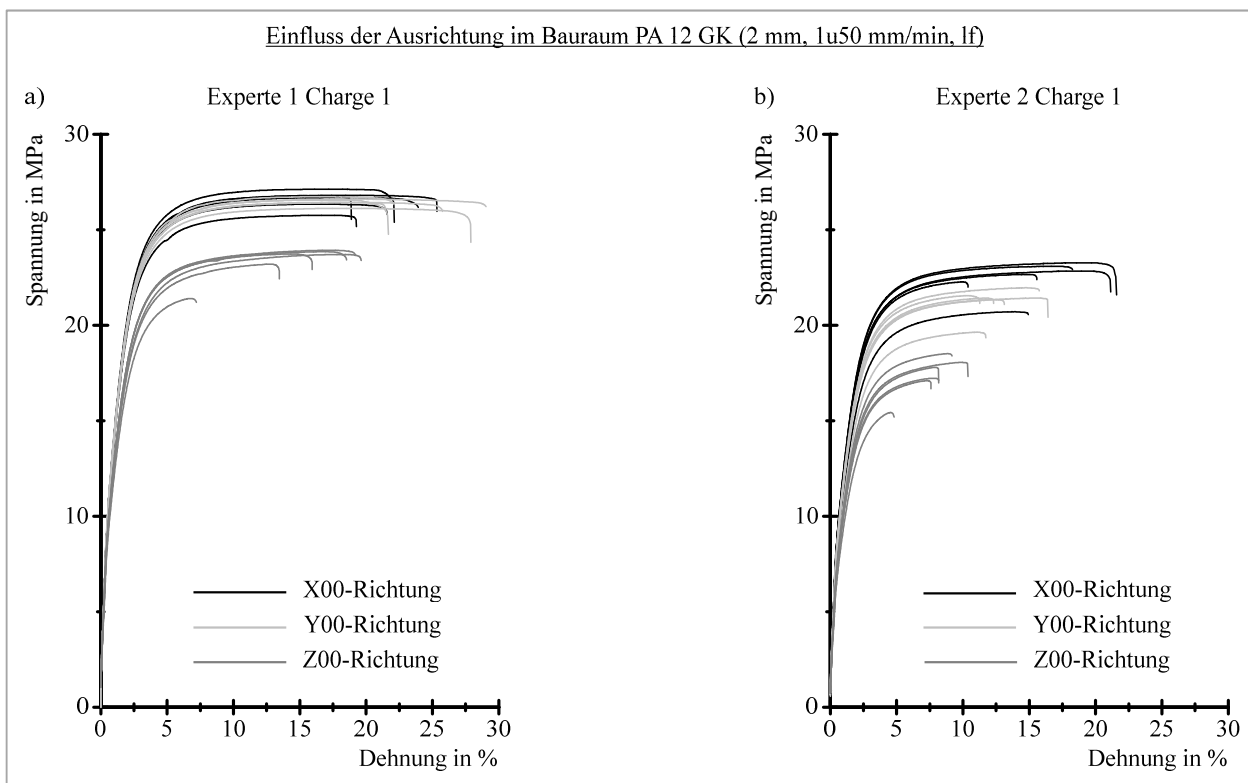


Abbildung 5.18: Spannungs-Dehnungs-Kurven von 2 mm dicken Sinterproben aus PA 12 GK; ermittelt an luftfeuchten Probestäben mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 und 50 mm/min

In beiden Versuchsreihen liegen die Kurvenverläufe der Z-Proben unter den Messkurven der X- und Y-Proben. Die Steifigkeits- und Festigkeitsabnahme ist auf die schlechtere Verbindung von zwei aufeinanderfolgenden Schichten zurückzuführen, die bei den mechanischen Eigenschaften in Baurichtung zum Tragen kommt (siehe Unterabschnitt 3.4.2). Auffällig ist, dass die Kurvenverläufe der Z-Proben von EXP\_2 (Diagramm b) in Abbildung 5.18) eine wesentlich größere Streuung aufweisen als die Kurven der Probestäbe von EXP\_1, dies ist bei den X- und Y-Proben auch der Fall. Die größere Streuung ist ein Indiz für Unregelmäßigkeiten im Lasersinterprozess und auf Poren im Inneren der Probestäbe, die ungleichmäßige Vermischung zwischen Neu- und Altpulver oder Schwankungen in der Bauraumtemperatur während des Sinterprozesses zurückzuführen. Der Grund für die erhöhte Streuung der Spannungs-Dehnungs-Kurven der Probestäbe von EXP\_2 ist, wie zuvor bereits erläutert (5.2.4), der höhere Porenanteil.

### Einfluss der Ausrichtung im Bauraum auf den Zug-E-Modul

Abbildung 5.19 zeigt die prozentuale Veränderung des E-Moduls von in Z-Richtung orientierten Probestäben. Als Bezugsgröße wird der E-Modul in X-Richtung des jeweiligen Versuchs verwendet. Im sinterfrischen Zustand liegt die Änderung bis auf eine Ausnahme im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Das Ergebnis einer Versuchsreihe weicht relativ deutlich von den restlichen Ergebnissen ab. Ohne die Berücksichtigung dieses Ergebnisses liegen die restlichen Versuchsreihen zwischen -5,4 und +5,1 %. Die Ergebnisse lassen keine eindeutige Beeinflussungsrichtung erkennen.

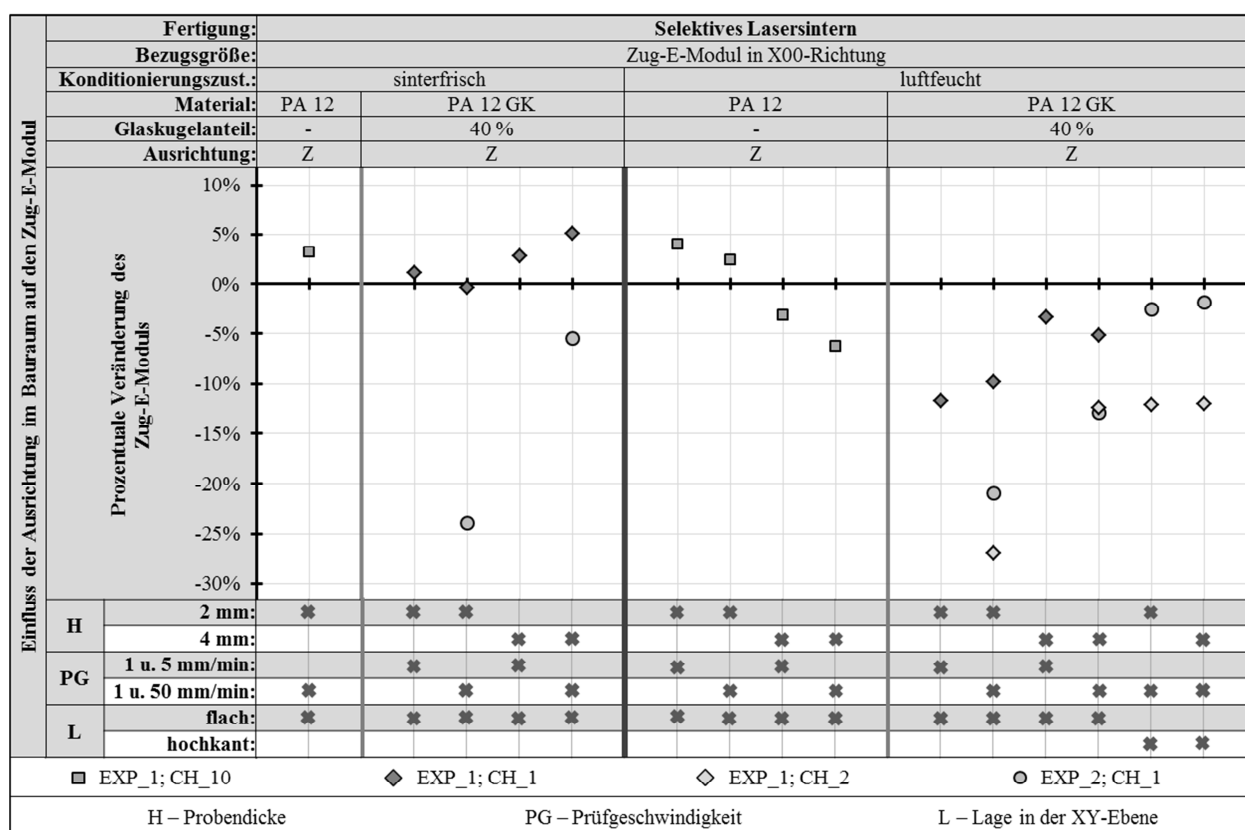


Abbildung 5.19: Einfluss der Ausrichtung des Probestabs im Bauraum der Sinteranlage auf den Zug-E-Modul von lasergesinterten Probestäben aus ungefülltem und glaskugelgefülltem PA 12

Die Streuung der Versuchsergebnisse der luftfeuchten Proben ist größer als die Streuung der sinterfrischen Probestäbe. Darüber hinaus ist bei den luftfeucht geprüften Probestäben die Tendenz zu erkennen, dass der Zug-E-Modul in Z-Richtung geringer ist als der Modul in X-Richtung. Lediglich bei zwei Versuchsreihen mit ungefüllten Probestäben ist der E-Modul in Z-Richtung größer als in X-Richtung. Zwei

Ergebnisse weichen relativ deutlich von den restlichen Messwerten ab. Ohne die Berücksichtigung dieser Versuchsreihen liegt die Streuung zwischen -12,9 und +4,0 %.

Die Versuchsreihen zur Untersuchung der Beeinflussung des E-Moduls durch die Ausrichtung in der XY-Ebene (siehe Abbildung 5.15) und die Untersuchungen zur Ausrichtung im Bauraum (siehe Abbildung 5.19) ergeben annähernd vergleichbare prozentuale Veränderungen. Auch die Streuung der Ergebnisse ist in beiden Versuchsreihen annähernd gleich. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Einfluss der Ausrichtung der Probestäbe im Bauraum der Sinteranlage nur einen geringen Einfluss auf den E-Modul der lasergesinter-ten Probestäbe hat.

### **Einfluss der Ausrichtung im Bauraum auf die Zugfestigkeit**

Abbildung 5.20 zeigt die prozentuale Veränderung der Zugfestigkeit in Z-Richtung. Als Vergleichsgrundlage wird in dieser Auswertung die Festigkeit in X-Richtung verwendet. Die Versuchsergebnisse zeigen einen deutlichen Rückgang der Festigkeit. In allen Versuchsreihen ist die Zugfestigkeit der Z-Proben geringer als die der in X-Richtung orientierten Probestäbe. Bei den Proben, die im sinterfrischen Zustand getestet wurden, ist die Festigkeitsabnahme nicht so stark ausgeprägt wie bei den luftfeucht geprüften Probestäben. Das Ergebnis einer Versuchsreihe weicht deutlich von den restlichen Versuchsreihen ab. Ohne die Berücksichtigung des abweichenden Ergebnisses liegt die Festigkeitsabnahme der sinterfrischen Z-Proben aus PA 12 GK zwischen -14,1 und -4,6 %.

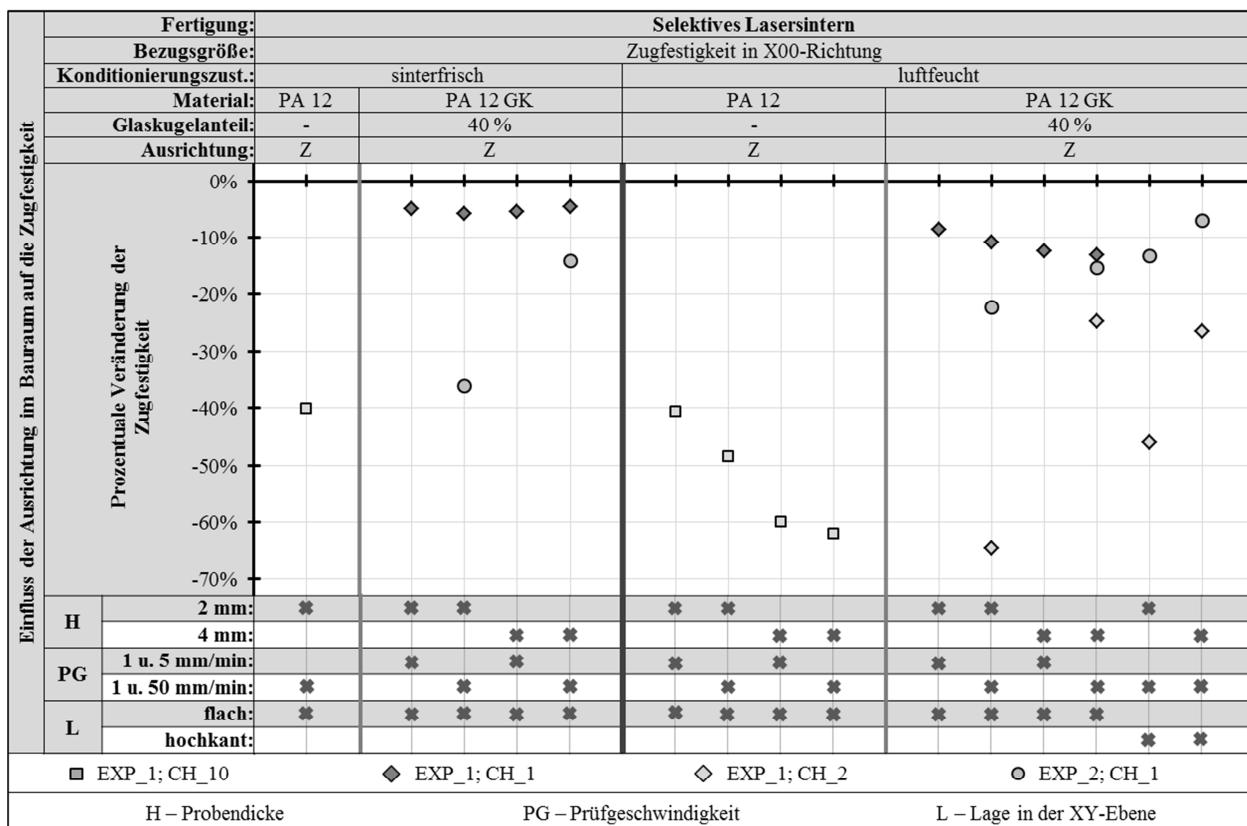


Abbildung 5.20: Einfluss der Ausrichtung des Probestabs im Bauraum der Sinteranlage auf die Zugfestigkeit von lasergesinteren Probestäben aus ungefülltem und glaskugelgefülltem PA 12

Im luftfeuchten Zustand ist die Festigkeitsabnahme in Baurichtung deutlich ausgeprägter als im sinterfrischen. Die prozentuale Veränderung liegt zwischen -64,8 und -8,7 %. Insbesondere die Versuchsreihen mit den ungefüllten Probestäben und den Stäben von EXP\_1 aus CH\_2 weichen merklich von den restlichen Versuchsergebnissen ab. Ohne die Berücksichtigung der zuvor genannten Versuchsreihen liegt die

Festigkeitsabnahme in Baurichtung im luftfeuchten Zustand zwischen 22,4 und 7,0 %. Eine Verringerung der Festigkeit in Baurichtung in dieser Größenordnung kann durch den geringeren Verschmelzungsgrad in Z-Richtung erklärt werden. Festigkeitsabnahmen von 40 % und mehr, wie sie bei den ungefüllten Stäben und den Stäben aus CH\_2 auftreten, sind jedoch nur durch Fehler im Sinterprozess zu erklären. Der Grund für die geringe Zugfestigkeit der ungefüllten Z-Proben wurde bereits erläutert (siehe Abschnitt 5.1). Die Festigkeitsabnahme ist bei diesen Probestäben auf nicht aufgeschmolzene Pulverkörner, die im Inneren des Probestabs flächig angeordnet sind, zurückzuführen (siehe Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 in Abschnitt 5.1). Da die Versuchsergebnisse der glaskugelgefüllten Probestäbe aus CH\_2 von EXP\_1 auch in den nachfolgenden Auswertungen relativ stark streuen, werden die Bruchflächen dieser Probestäbe ebenfalls genauer untersucht, um den Grund für die großen Abweichungen herauszufinden.

### Mikroskopische Untersuchung der Stäbe von EXP\_1 aus CH\_2

Grundsätzlich sind die niedrigeren Festigkeitseigenschaften in Z-Richtung auf einen geringeren Verschmelzungsgrad und das Vorhandensein von nicht aufgeschmolzenen Partikeln sowie Poren, die sich bevorzugt zwischen zwei Schichten des Bauteils anlagern, zurückzuführen (siehe Abschnitt 2.6). Die mikroskopische Untersuchung der Probestäbe von EXP\_1 aus CH\_2 zeigt, dass das Vorhandensein von nicht aufgeschmolzenen Pulverkörnern auch in diesem Fall der Grund für die geringe Zugfestigkeit dieser Sinterproben ist. Abbildung 5.21 zeigt die Bruchfläche einer Z-Probe aus dieser Charge.

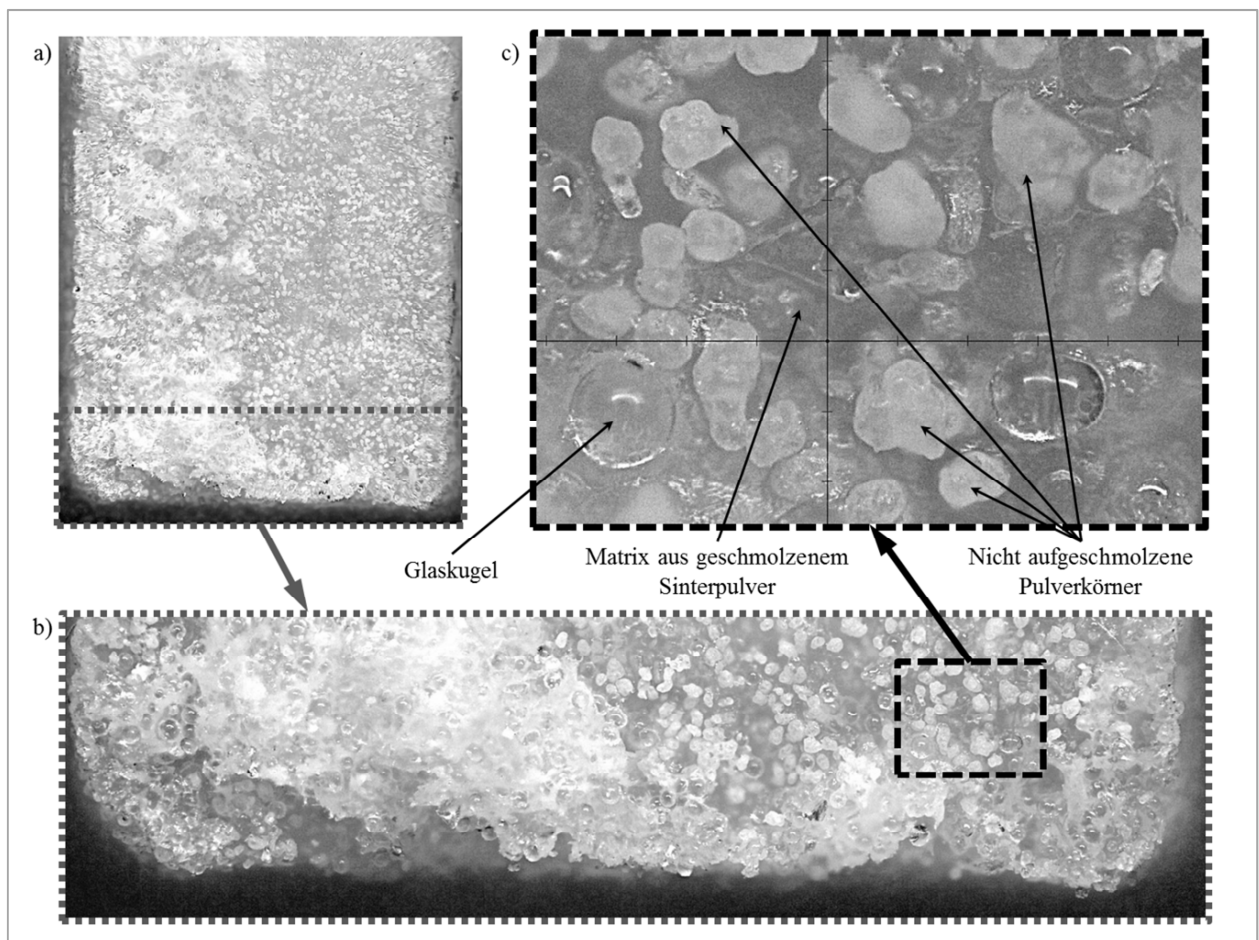


Abbildung 5.21: Nicht aufgeschmolzene Pulverkörner in der Bruchfläche einer Z-Probe von EXP\_1 aus CH\_1

Die Bilder a) und b) in Abbildung 5.21 zeigen, dass lediglich die linke Hälfte des Probestabs eine normal zerklüftete Oberfläche aufweist. Die rechte Hälfte der Bruchfläche ist sehr eben. Darüber hinaus ist eine

große Anzahl nicht aufgeschmolzener Pulverpartikel zu erkennen. Die nicht aufgeschmolzenen Partikel sind in Bild c) der Abbildung 5.21 sehr gut zu erkennen. Sie sind eindeutig von der Polymermatrix aus vollständig aufgeschmolzenen Partikeln und den eingebetteten Glaskugeln zu unterscheiden. Auch die Schliffbilder einer Z-Probe aus CH\_2 zeigen, dass im Inneren des Stabes eine Vielzahl von nicht aufgeschmolzenen Partikeln vorhanden ist (siehe Abbildung 5.22). Zusätzlich sind in den Bildern einige kleinere Poren erkennbar, die ebenfalls negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben. Im Schliffbild der Seitenfläche (siehe Abbildung 5.22 rechts) ist der Schichtaufbau des Probestabs deutlich zu erkennen. Die nicht aufgeschmolzenen Partikel befinden sich vorrangig zwischen zwei Schichten. Dies spricht dafür, dass die durch den Laserstrahl eingebrachte Energie nicht ausgereicht hat, um die unteren Partikel der jeweiligen Pulverschicht vollständig aufzuschmelzen. Ein Grund hierfür kann stark gealtertes Sinterpulver sein (siehe Unterabschnitt 3.5.4).

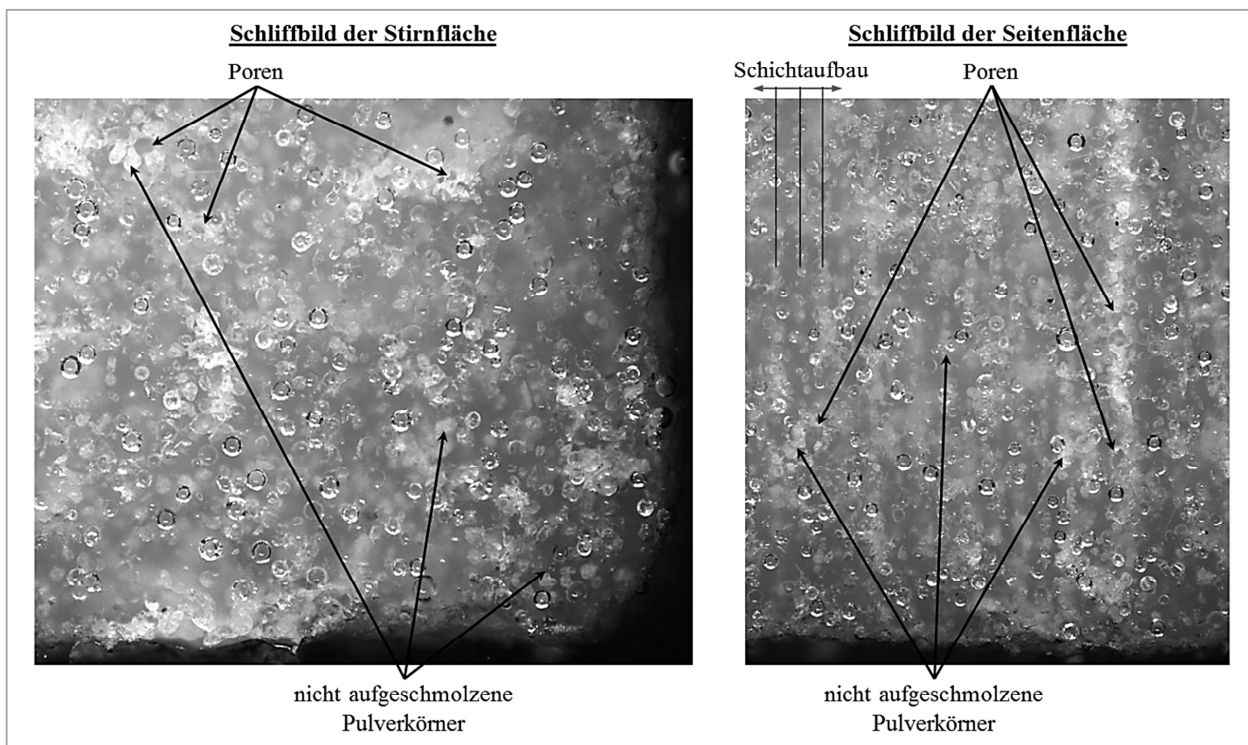


Abbildung 5.22: Schliffbilder einer 4 mm dicken Z-Probe aus CH\_2 von EXP\_1

### Einfluss der Ausrichtung im Bauraum auf die Dehnung bei Zugfestigkeit

Abbildung 5.23 zeigt die ausrichtungsbedingte Beeinflussung der Dehnung bei Zugfestigkeit. In der Abbildung ist die prozentuale Veränderung dieses Kennwerts für die in Baurichtung orientierten Probestäbe dargestellt. Die Versuchsergebnisse verdeutlichen, dass das Verformungsverhalten von Sinterproben sehr stark durch die Ausrichtung im Herstellungsprozess beeinflusst wird. Sowohl im sinterfrischen als auch im luftfeuchten Zustand ist die Dehnung bei Zugfestigkeit der Z-Proben deutlich geringer als die der X-Proben. Insgesamt liegt die Streuung der Versuchsergebnisse zwischen -94,5 und +6,0 %. Auffällig ist, dass die Ergebnisse der ungefüllten Probestäbe erneut erheblich von den Ergebnissen der glaskugelgefüllten Zugproben abweichen. Auch die Kennwerte der glaskugelgefüllten Stäbe von EXP\_1 aus CH\_2 weichen erneut relativ deutlich von den Ergebnissen der restlichen Versuchsreihen ab. Der Grund hierfür sind, wie zuvor bereits erläutert, nicht aufgeschmolzene Pulverkörner. Ohne die gerade genannten Versuchsreihen liegen alle Ergebnisse zur Quantifizierung des Einflusses der Ausrichtung auf die Dehnung bei Zugfestigkeit zwischen -55,0 und +6,0 %.

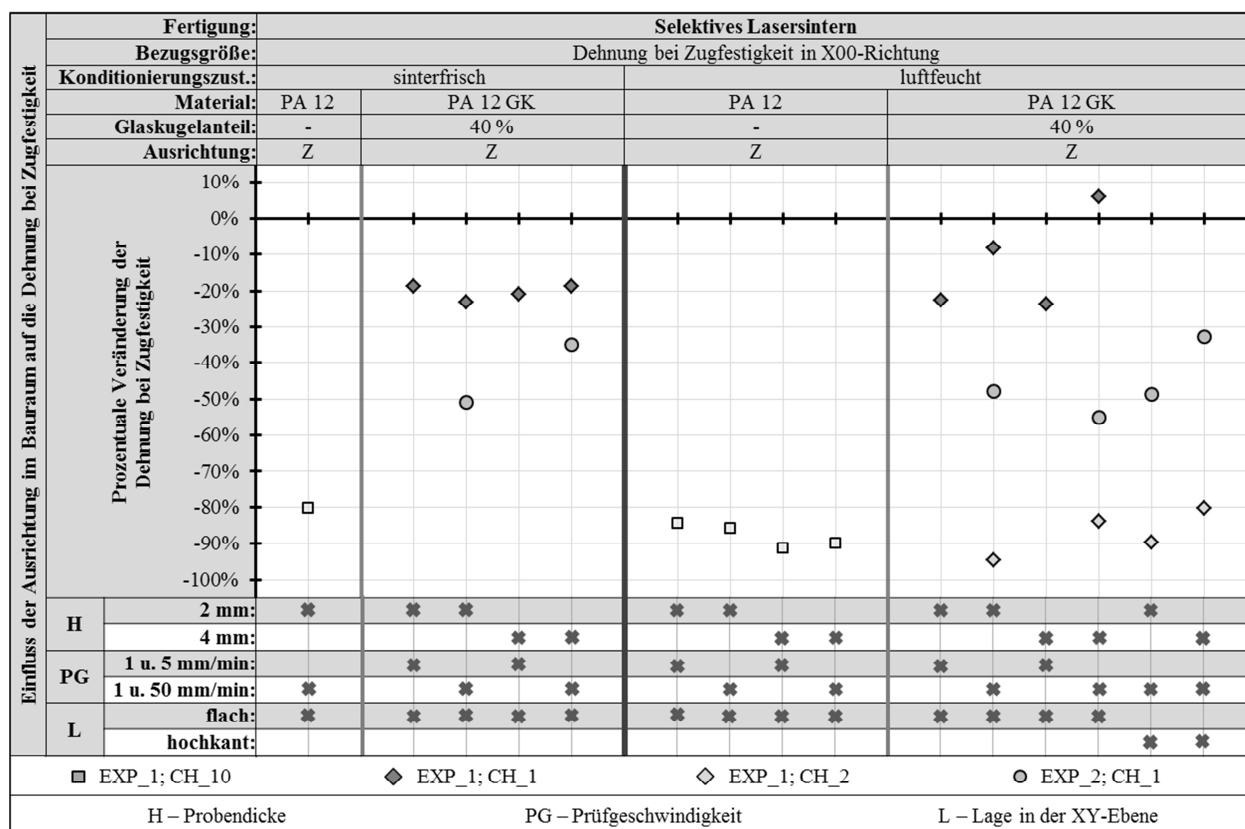


Abbildung 5.23: Einfluss der Ausrichtung des Probestabs im Bauraum der Sinteranlage auf die Dehnung bei Zugfestigkeit von lasergesinterten Probestäben aus ungefülltem und glaskugelgefülltem PA 12

### Hochkant angeordnete Proben

Zusätzlich zu den Probestäben, deren Oberfläche im Sinterprozess parallel zur XY- bzw. XZ-Ebene (X00-, Y00-, Z00-Stäbe) ausgerichtet ist, werden nachfolgend Zugproben untersucht, deren Oberfläche im Herstellungsprozess senkrecht (X90-, Y90-, Z90-Stäbe) zu den zuvor genannten Ebenen ausgerichtet ist (Bezeichnung und Ausrichtung der Stäbe gemäß Unterabschnitt 4.3.1). Abbildung 5.24 zeigt, dass der Einfluss der Ausrichtung der Oberfläche der Probestäbe bezüglich der XY-Ebene bei 2 mm dicken Proben wesentlich stärker ausgeprägt ist als bei 4 mm dicken Stäben. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der 2 mm dicken X90-Stäbe, deren Oberfläche bei der Herstellung senkrecht zur XY-Ebene ausgerichtet ist, verlaufen deutlich unterhalb der Kurven der X00-Proben gleicher Dicke. Der arithmetische Mittelwert des Zug-E-Moduls der 2 mm dicken X90-Proben ist ca. 20 % und die Zugfestigkeit ca. 15 % kleiner als die entsprechenden Kennwerte der X00-Proben.

Auch das Verhalten der 4 mm dicken Sinterproben ist abhängig von der Ausrichtung ihrer Oberfläche im Sinterprozess. Die 4 mm dicken X90-Proben haben eine geringere Steifigkeit und eine geringere Festigkeit als die X00-Stäbe. Der arithmetische Mittelwert des Zug-E-Moduls der 4 mm dicken X90-Proben ist jedoch lediglich um ca. 12 % und die Zugfestigkeit um ca. 6 % geringer als die der X00-Proben gleicher Dicke. Somit ist die Beeinflussung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens bei den 4 mm dicken Proben wesentlich schwächer ausgeprägt als bei den 2 mm dicken Probestäben. Der gleiche Effekt wie bei den X-Proben ist auch bei den in Y-Richtung orientierten Probestäben feststellbar. Auf die Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Kurven wird an dieser Stelle verzichtet. Sie befinden sich im Anhang (siehe Abbildung 10.3).

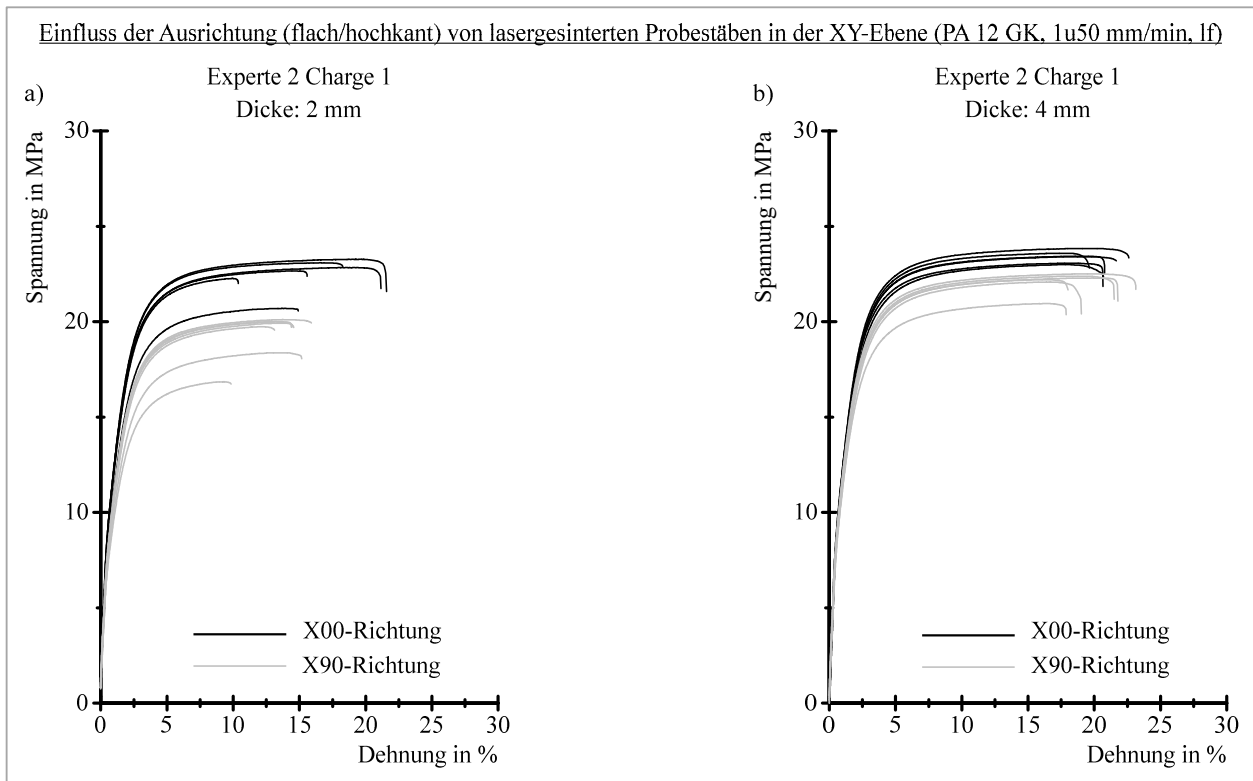


Abbildung 5.24: Einfluss des Winkels zwischen der Oberfläche des Probestabs und der Bauplattform;  
Diagramm a) Spannungs-Dehnungs-Kurven der 2 mm dicken X00- und X90-Probestäbe  
Diagramm b) Spannungs-Dehnungs-Kurven der 4 mm dicken X00- und X90-Probestäbe

Im Gegensatz zu den X- und Y-Proben zeigen die Spannungs-Dehnungs-Kurven der Z-Proben keine signifikante Beeinflussung, die auf die Ausrichtung der Oberfläche der Probestäbe während des Sinterprozesses zurückzuführen ist (siehe Abbildung 5.25).

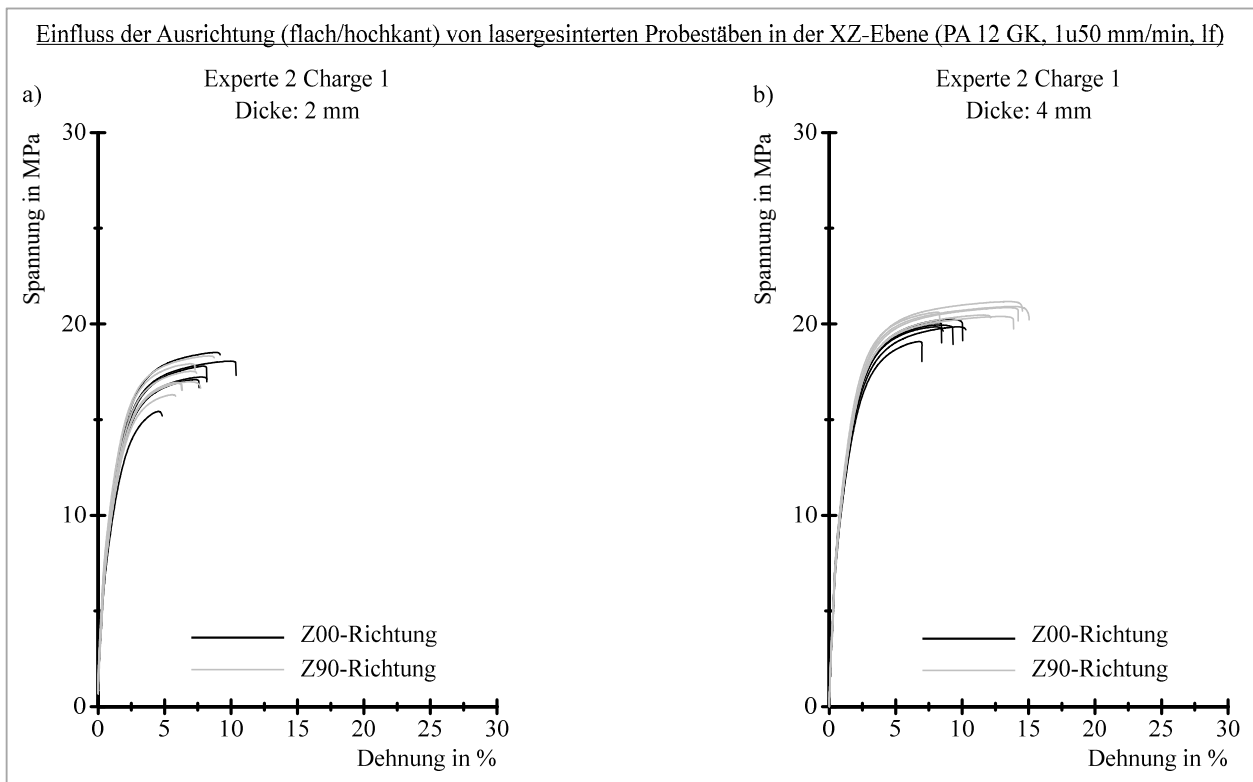


Abbildung 5.25: Einfluss des Winkels zwischen der Oberfläche des Probestabs und der XZ-Ebene;  
Diagramm a) Spannungs-Dehnungs-Kurven der 2 mm dicken Z00- und Z90-Probestäbe  
Diagramm b) Spannungs-Dehnungs-Kurven der 4 mm dicken Z00- und Z90-Probestäbe

Der Grund für die Verschlechterung der mechanischen Kennwerte der X90- und Y90-Proben ist die Anzahl der Schichten und damit die mögliche Anzahl von Fehlern, aus denen der Prüfquerschnitt der Probe besteht (siehe Abbildung 5.26). Der parallele Teil des Probestabs der 4 mm dicken X00-Proben SETZT SICH aus 40 einzelnen Schichten und der planparallele Teil der X90-Proben aus 50 Schichten zusammen. Die Anzahl der Schichten steigt durch die Umorientierung des Probestabs somit um 25 %. Mit der Anzahl der Schichten nimmt auch die Anzahl der Kontaktstellen zwischen zwei Schichten zu. Diese Kontaktstellen haben, bedingt durch Abkühlungseffekte im Sinterprozess, schlechtere mechanische Eigenschaften als die Kontaktstellen zwischen zwei Zeilen (siehe Unterabschnitt 3.4.2). Bei den 2 mm dicken Probestäben ist der orientierungsbedingte Unterschied in der Anzahl der Einzelschichten des Prüfquerschnitts erheblich größer. Hier steigt die Anzahl von 20 für die X00-Proben auf 50 für die X90-Proben, was einer prozentualen Zunahme von 150 % entspricht. Auf diese Weise kann der stärkere Rückgang der mechanischen Kennwerte bei den 2 mm dicken Proben erklärt werden. Bei den Z-Proben hingegen ändert sich die Anzahl der Schichten, aus denen der Prüfquerschnitt besteht, durch die Umorientierung des Probestabs nicht. Aus diesem Grund zeigen diese Stäbe auch keine signifikante Beeinflussung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens.

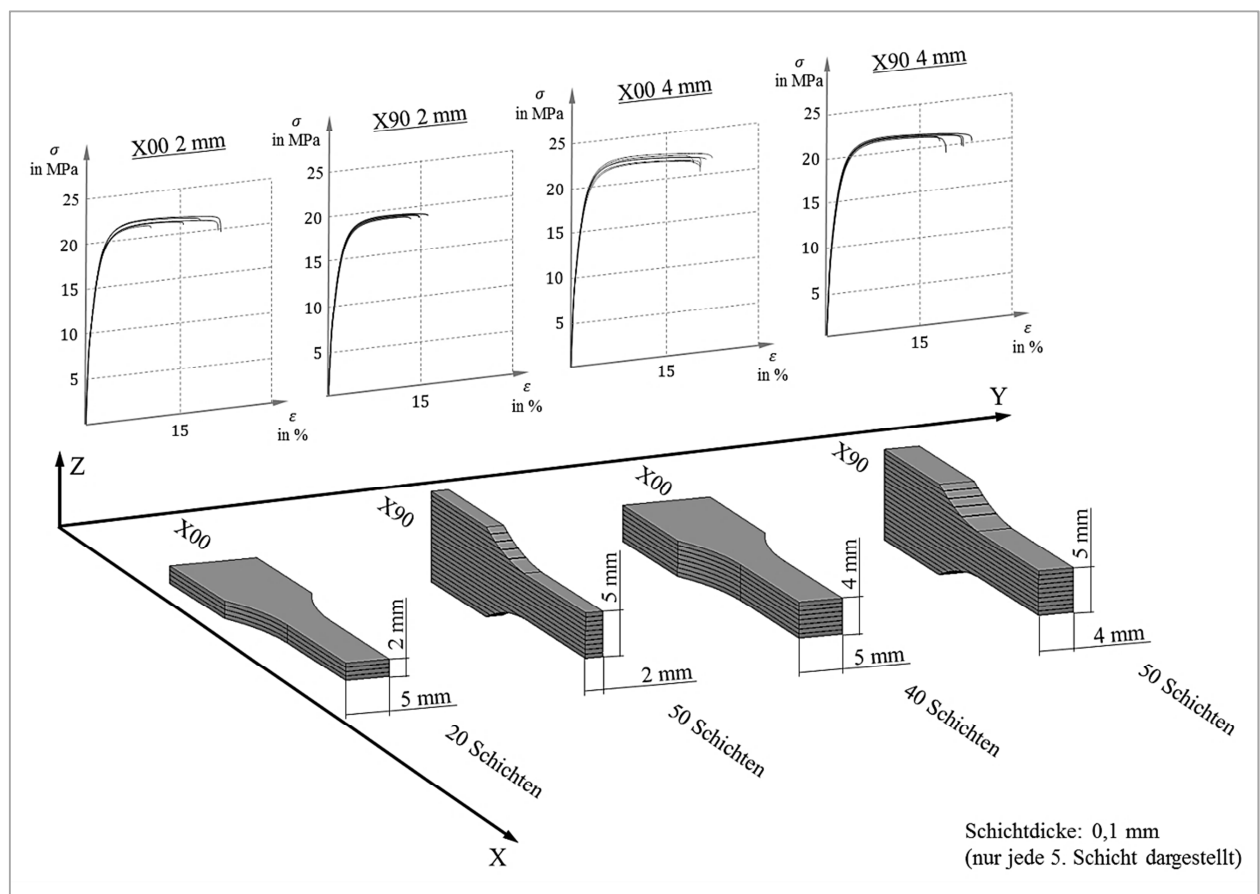


Abbildung 5.26: Anzahl an Einzelschichten des Prüfquerschnitts der Probe

Zusätzlich zu den Probestäben, deren Längsachse jeweils parallel zu einer der drei Hauptachsen der Sinteranlage verläuft, wird im Folgenden das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von diagonal ausgerichteten Probestäben diskutiert (Bezeichnung und Orientierung der Stäbe gemäß Unterabschnitt 4.3.1). Die Ergebnisse dieser Zugversuche werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit zur Definition eines anisotropen Materialmodells benötigt (siehe Unterabschnitt 6.6.2).



### Diagonal in der XY-Ebene angeordnete Probestäbe

In Abbildung 5.27 sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven der 2 mm dicken Stäbe X00, Y00 und XY45 dargestellt. Alle Kurven verlaufen annähernd gleich. Dieses Ergebnis bestätigt, dass die mechanischen Eigenschaften von parallel zur Bauplattform orientierten Probestäben, die mithilfe der Kreuz-Strategie hergestellt werden, unabhängig von ihrer Ausrichtung in der XY-Ebene, annähernd gleich sind (siehe hierzu auch Unterabschnitt 5.2.4).

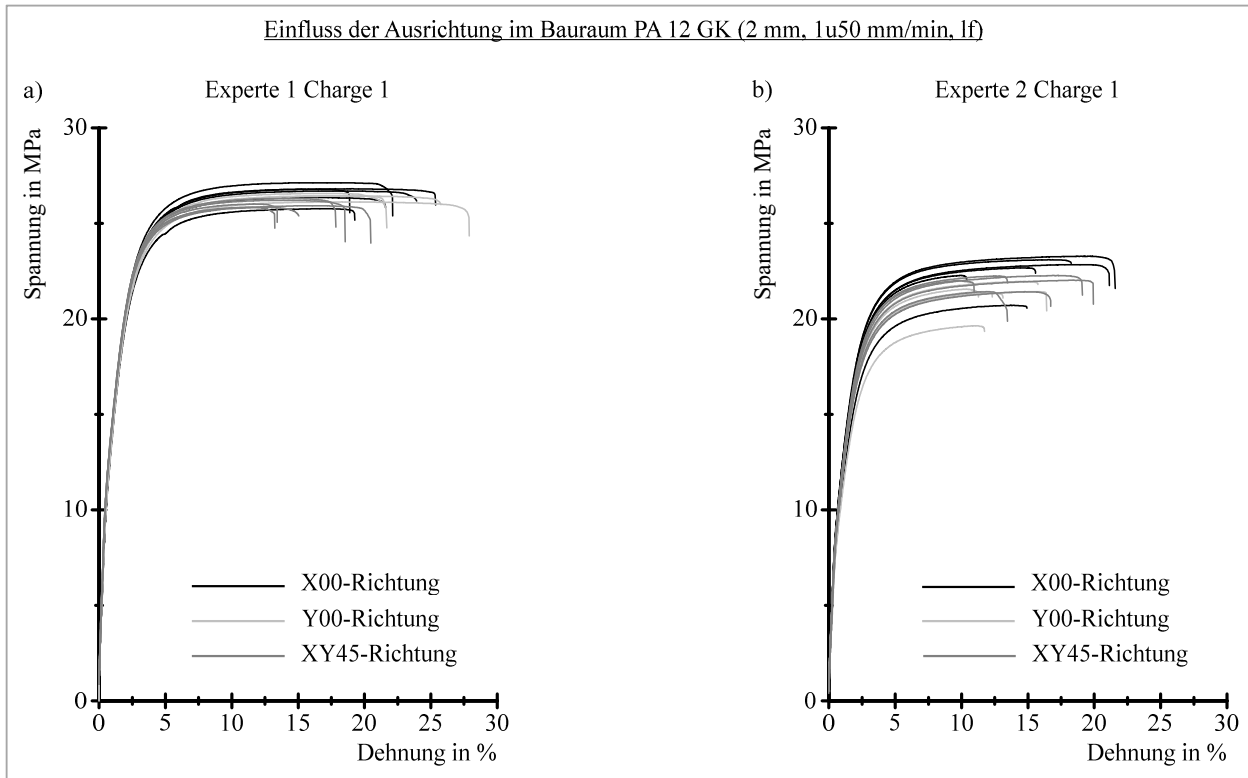


Abbildung 5.27: Versuchsergebnisse in X-, Y- und XY45-Richtung der 2 mm dicken Sinterproben aus PA 12 GK; ermittelt an luftfeuchten Probestäben mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 und 50 mm/min

### Diagonal im Bauraum angeordnete Probestäbe

Aufgrund des in Unterabschnitt 5.2.5 erläuterten anisotropen Verhaltens von lasergesintertem PA 12 ist davon auszugehen, dass die Spannungs-Dehnungs-Kurven der XZ45- bzw. YZ45-Proben jeweils zwischen den Kurven der X- bzw. Y-Proben und denen der Z-Proben liegen, da die Festigkeit der diagonal angeordneten Stäbe durch den anteiligen Einfluss der geringeren mechanischen Eigenschaften in Baurichtung verringert werden müsste. Zur Überprüfung dieser Annahme werden ebenfalls Zugversuche durchgeführt. In Abbildung 5.28 sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven von in X-, Z- und XZ45-Richtung ausgerichteten 2 mm dicken Probestäben dargestellt. Die Kurvenverläufe zeigen, dass insbesondere die Versuche mit den Probestäben von EXP\_1 das erwartete Ergebnis geliefert haben. Die Zugfestigkeit der XZ45-Proben von EXP\_1 ist höher als die Festigkeit der Z-Proben und geringer als die der X-Proben. Die Versuche mit den Sinterproben von EXP\_2 zeigen ein etwas anderes Ergebnis. Hier fallen die Spannungs-Dehnungs-Kurven der XZ45-Stäbe nahezu mit den Kurven der Z00-Stäbe zusammen. Für das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der jeweiligen YZ-Proben ergeben sich ähnliche Kurvenverläufe. Auf die Darstellung der Ergebnisse wird an dieser Stelle jedoch verzichtet. Die entsprechenden Spannungs-Dehnungs-Diagramme befinden sich im Anhang dieser Arbeit (siehe Abbildung 10.4).

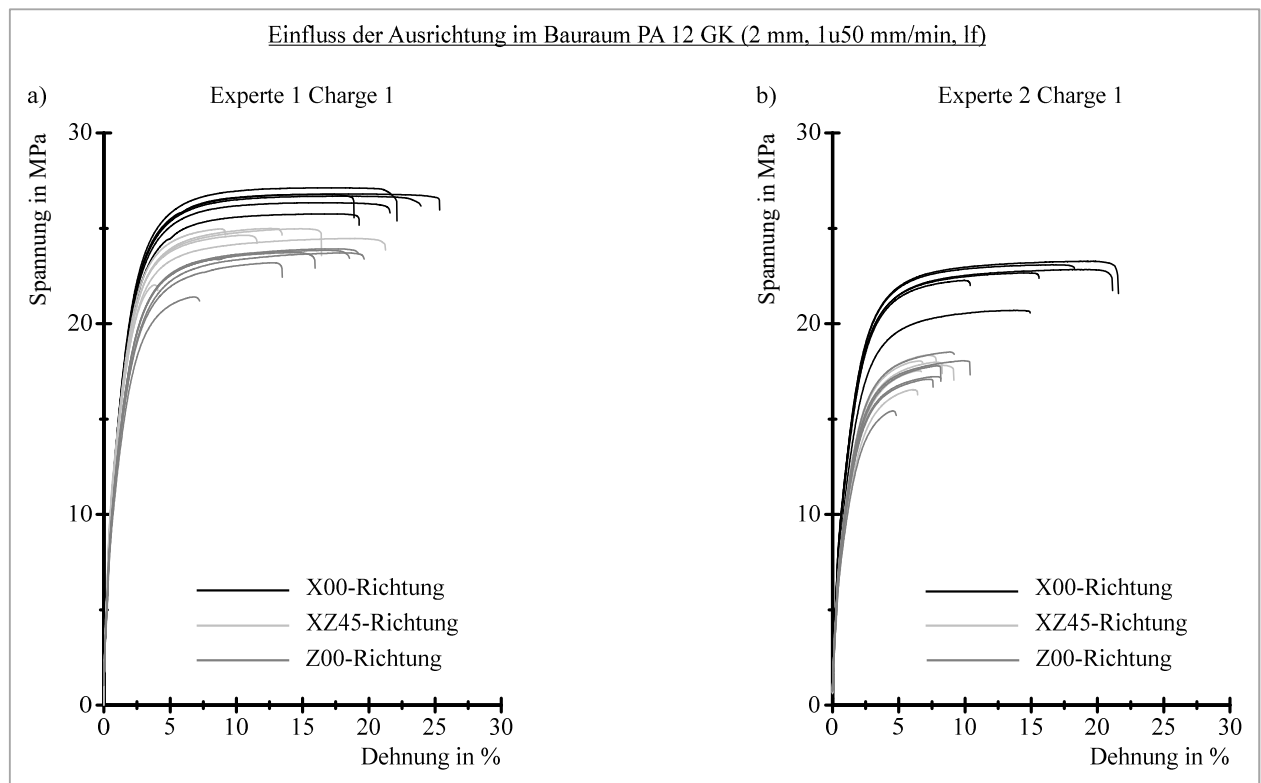


Abbildung 5.28: Versuchsergebnisse in X-, Z- und XZ45-Richtung der 2 mm dicken Sinterproben aus PA 12 GK; ermittelt an luftfeuchten Probestäben mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 und 50 mm/min

### 5.2.6 Bewertung der Untersuchung der Anisotropie von Sinterpolyamiden

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen können die Eigenschaften von Probestäben, die flach in der XY-Ebene positioniert sind, als isotrop angesehen werden. Die prozentuale Veränderung der in dieser Ebene gemessenen Kennwerte liegt fast durchgängig im einstelligen Prozentbereich und zeigt keine eindeutige Tendenz, die auf die Ausrichtung der Probestäbe zurückzuführen ist. Der Festigkeitsabfall und die Reduzierung der Dehnung bei Zugfestigkeit in Baurichtung müssen bei der Beurteilung der mechanischen Eigenschaften von Sinterpolyamiden jedoch zwingend berücksichtigt werden. Die Ergebnisse von Belastungsversuchen können nur dann korrekt interpretiert werden, wenn die Ausrichtung der Sinterteile während des Sinterprozesses bekannt ist.

Des Weiteren sollte die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften von Sinterpolyamiden bei der Materialmodellierung und der Durchführung von Struktursimulationen berücksichtigt werden. Die isotropen Eigenschaften in der XY-Ebene vereinfachen die Erstellung des Materialmodells allerdings erheblich, da lediglich die Anisotropie in Z-Richtung berücksichtigt werden muss. Das Materialverhalten des Sinterwerkstoffs kann demnach mithilfe eines transversal-isotropen Materialmodells beschrieben werden (siehe Kapitel 6). In Tabelle 5.5 sind die Ergebnisse zur Ermittlung der Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von glaskugelgefülltem PA 12 in der Übersicht dargestellt. Die prozentuale Veränderung der gemessenen Kennwerte liegt bei EXP\_1 und EXP\_2 in der gleichen Größenordnung, obwohl die gemessenen Absolutkennwerte und die Streuung der einzelnen Versuchsreihen (siehe Abbildung 5.11 und Abbildung 5.18) voneinander abweichen. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften von glaskugelgefülltem Sinterpolyamid, die aus dem schichtweisen Herstellungsprozess resultiert, bei unterschiedlichen Sinterexperten prozentual gesehen vergleichbar stark ausgeprägt ist. Die Streuung der Absolutkennwerte von EXP\_1 und EXP\_2 wird in Abschnitt 5.6 ausführlich analysiert.

Tabelle 5.5: Ergebnisübersicht zur Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem PA 12 GK

Quantifizierung der Richtungsabhängigkeit für lasergesintertes PA 12 GK							
		Zug-E-Modul		Zugfestigkeit		Dehnung bei Zugfestigkeit	
		sf	lf	sf	lf	sf	lf
X		Bezugsgröße	Bezugsgröße	Bezugsgröße	Bezugsgröße	Bezugsgröße	Bezugsgröße
Y	EXP_1	+2,0 bis +3,5 %	-5,9 bis +9,5 %	+3,3 bis +4,6 %	-5,3 bis +3,4 %	-0,3 bis +6,2 %	-7,5 bis +4,2 %
	EXP_2	-8,8 bis +0,6 %	-7,0 bis +6,7 %	+1,2 bis +6,1 %	-5,7 bis ±0,0 %	-6,9 bis -5,4 %	-18,7 bis +3,2 %
Z	EXP_1	-0,4 bis +5,1 %	-12,4 bis -3,3 %	-5,8 bis -4,6 %	-13,1 bis -8,7 %	-23,3 bis -18,7 %	-23,8 bis +6,0 %
	EXP_2	(-24,0) bis -5,4 %	-12,9 bis -2,6 %	(-36,1) bis -14,1 %	-22,4 bis -7,0 %	-50,8 bis -35,1 %	-55,0 bis -32,8 %

In Tabelle 5.6 sind zusätzlich die Ergebnisse zur Ermittlung der richtungsabhängigen Eigenschaften von ungefülltem PA 12 in der Übersicht dargestellt. Die großen Abweichungen in Z-Richtung sind auf Sinterfehler (siehe Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 in Abschnitt 5.1) und nicht auf die aus dem Sinterprozess resultierende Anisotropie zurückzuführen.

Tabelle 5.6: Ergebnisübersicht zur Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem PA 12

Quantifizierung der Richtungsabhängigkeit für lasergesintertes PA 12							
		Zug-E-Modul		Zugfestigkeit		Dehnung bei Zugfestigkeit	
		sf	lf	sf	lf	sf	lf
X	EXP_1	Bezugsgröße	Bezugsgröße	Bezugsgröße	Bezugsgröße	Bezugsgröße	Bezugsgröße
Y	EXP_1	7,1 %	+0,6 bis +4,3 %	1,2 %	+0,7 bis +2,0 %	+0,4 %	-9,8 bis +6,3 %
Z	EXP_1	3,2 %	-6,3 bis 4,0 %	-40,2 %	-62,2 bis -40,6 %	-80,4 %	-91,2 bis -84,6 %

### 5.2.7 Vergleich der Anisotropie von glaskugelgefüllten Sinter- und Spritzgusspolyamiden

Zur Untersuchung der richtungsabhängigen Eigenschaften der Spritzgusswerkstoffe mit 30 und 50 % Glaskugelanteil (siehe Tabelle 4.2) werden Probestäbe verwendet, die unter verschiedenen Winkeln aus einer mit einem Filmanguss angespritzten Platte herausgefräst werden. Abbildung 5.29 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Kurven von 2 mm dicken Probestäben, die im luftfeuchten Zustand mit einer Prüfungsgeschwindigkeit von 1 mm/min zur Modulermittlung und 50 mm/min für den Rest der Prüfung untersucht werden. Anhand der Kurvenverläufe wird deutlich, dass sich der Spritzgusswerkstoff mit 30 % Glaskugelanteil unabhängig von der Orientierung der Probestäbe isotrop verhält (Diagramm a) in Abbildung 5.29). Der mit 50 % Glaskugelmassenanteil gefüllte Werkstoff zeigt ein sehr schwach ausgeprägtes anisotropes Verhalten. Sowohl die Zugfestigkeit als auch die Bruchdehnung der Stäbe P45 und P00 ist etwas höher als die jeweiligen Kennwerte der quer zur Fließrichtung ausgerichteten Stäbe P90.

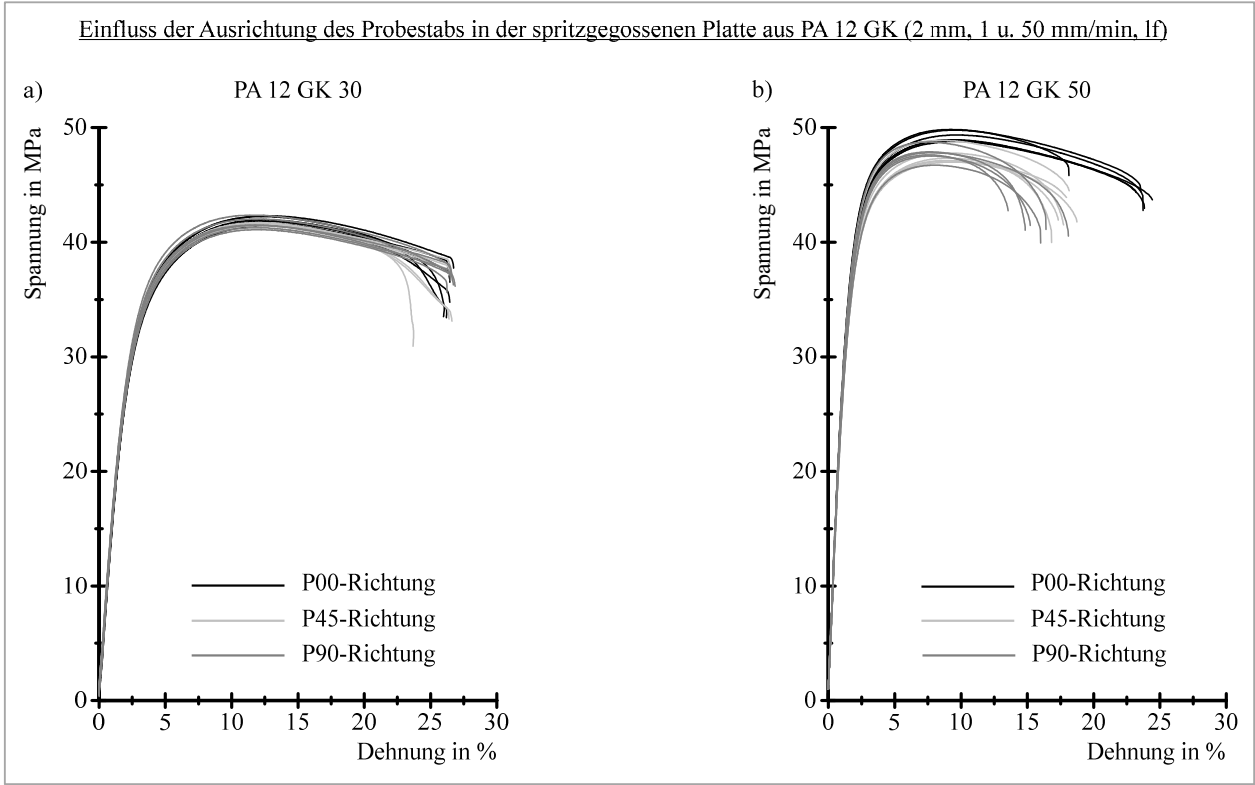


Abbildung 5.29: Diagramm a) Spannungs-Dehnungs-Kurven von Probestäben mit 30 % Glaskugelanteil;  
Diagramm b) Spannungs-Dehnungs-Kurven von Probestäben mit 30 % Glaskugelanteil;  
Probestäbe unter verschiedenen Winkeln (0, 45, 90° zur Fließrichtung) aus einer spritzgegossenen Platte herausgefräst

Vergleich der Anisotropie des Zug-E-Moduls

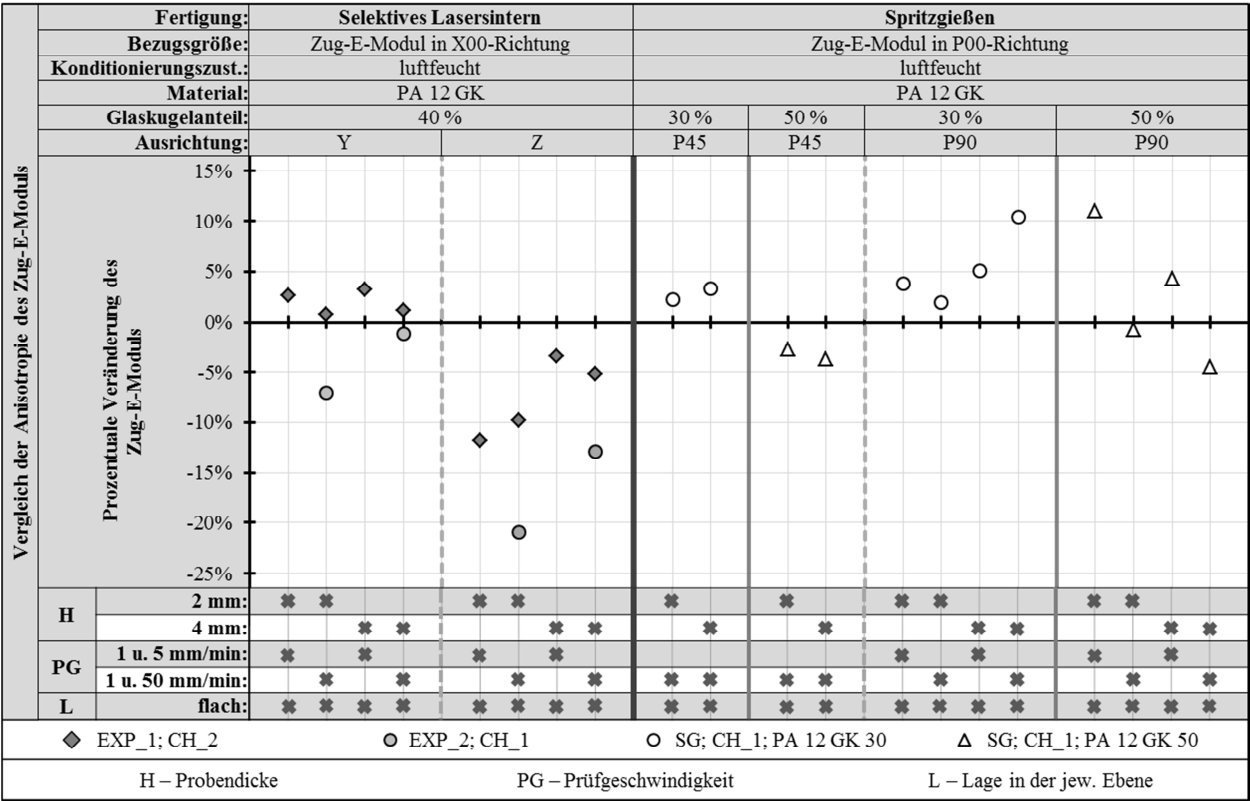


Abbildung 5.30: Vergleich des Einflusses der Anisotropie des Zug-E-Moduls von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben aus PA 12 GK

Der grafische Vergleich der Anisotropie des Zug-E-Moduls von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben aus PA 12 GK zeigt, dass die Richtungsabhängigkeit bei den lasergesinterten Probestäben wesentlich stärker ausgeprägt ist (siehe Abbildung 5.30). Die prozentuale Veränderung des E-Moduls der spritzgegossenen Probestäbe liegt bei fast allen Versuchsreihen im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Lediglich zwei Versuchsreihen ergeben eine geringfügig größere Veränderung. Der E-Modul der P45- und P90-Stäbe mit 30 % Glaskugelanteil ist in allen Versuchsreihen größer als der Modul der in Fließrichtung orientierten Stäbe. Bei den Zugproben mit 50 % Glaskugeln ist keine derartige Tendenz zu erkennen. Insgesamt ist die prozentuale Veränderung des E-Moduls der spritzgegossenen Probestäbe sehr gering und liegt innerhalb des zu erwartenden Streubereichs.

### Vergleich der Anisotropie der Zugfestigkeit

Die Auswertung der Versuche zur Untersuchung der Anisotropie der Zugfestigkeit zeigt, dass für das Spritzgussmaterial keine signifikante Beeinflussung durch die Orientierung der Probestäbe feststellbar ist (siehe Abbildung 5.31). Die prozentuale Veränderung liegt in allen Versuchsreihen im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Der grafische Vergleich zeigt, dass die Anisotropie des Sintermaterials in Z-Richtung wesentlich deutlicher ausgeprägt ist als die des Spritzgussmaterials.

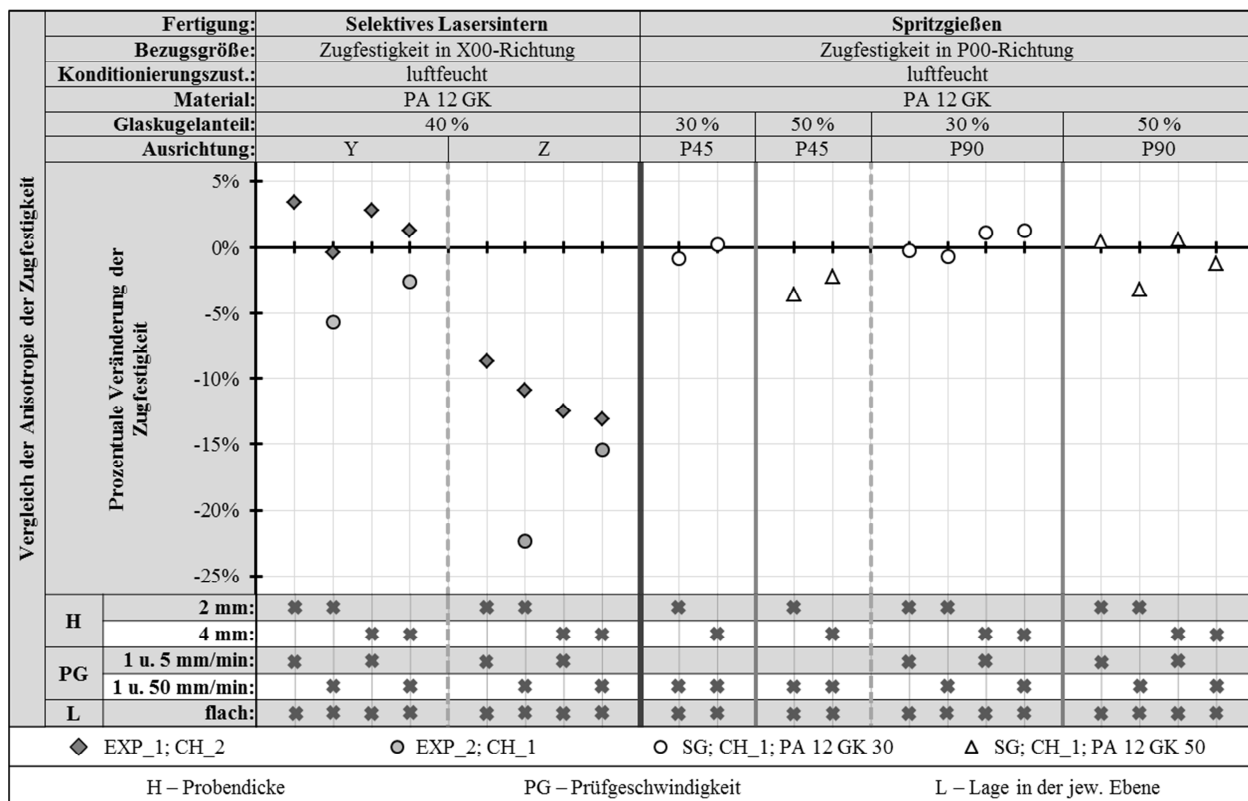


Abbildung 5.31: Vergleich des Einflusses der Anisotropie der Zugfestigkeit von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben aus PA 12 GK

### Vergleich der Anisotropie der Dehnung bei Zugfestigkeit

Die Richtungsabhängigkeit der Dehnung bei Zugfestigkeit ist beim Sintermaterial ebenfalls stärker ausgeprägt als beim Spritzgussmaterial (siehe Abbildung 5.32). Lediglich bei den spritzgegossenen Probestäben mit einem Kugelgewichtsanteil von 50 % und 2 mm Dicke wird die Dehnung bei Zugfestigkeit nennenswert durch die Ausrichtung des Probestabs beeinflusst. Bei den restlichen Versuchsreihen liegt die prozentuale Veränderung des Kennwerts im niedrigen einstelligen Prozentbereich.

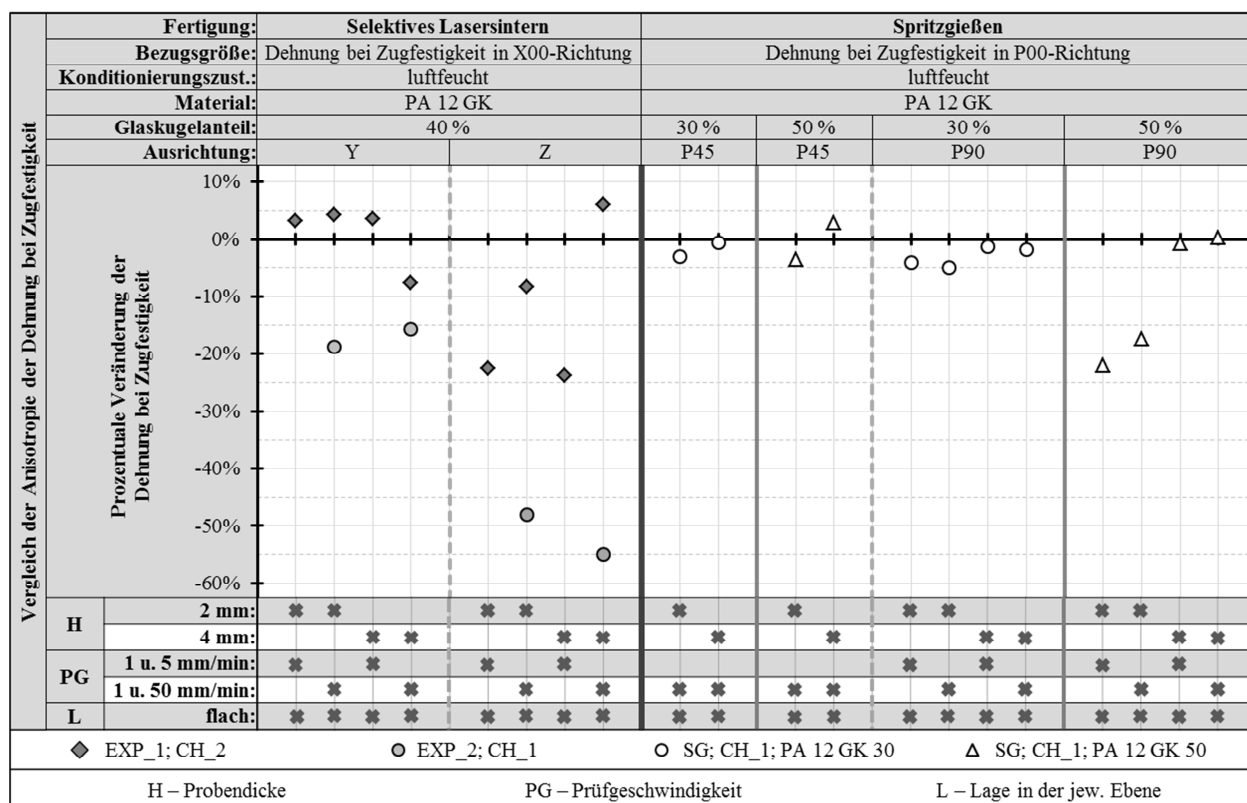


Abbildung 5.32: Vergleich des Einflusses der Anisotropie der Dehnung Zugfestigkeit von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben aus PA 12 GK

### Bewertung der Ergebnisse des Vergleichs der anisotropen Eigenschaften

Die Versuche zeigen, dass die untersuchten Spritzgussmaterialien keine oder nur sehr schwach ausgeprägte anisotrope Eigenschaften haben. Der Grund hierfür ist, dass Glaskugeln, wie oben bereits erwähnt, ein Aspekt-Verhältnis von eins haben und somit keine Vorzugsorientierung aufweisen können. Aufgrund der Versuchsergebnisse wird das glaskugelgefüllte Spritzgussmaterial im weiteren Verlauf dieser Arbeit als isotrop angesehen. Beim quantitativen Vergleich der mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 mit Glaskugelfüllung muss daher lediglich die Anisotropie des Sintermaterials berücksichtigt werden.

## 5.3 Charakterisierung des Einflusses der Wasseraufnahme

Die mechanischen Eigenschaften von Polyamiden werden durch Wasseraufnahme erheblich beeinflusst (siehe Unterabschnitt 2.5.2). Deshalb dürfen zur Dimensionierung von Polyamidbauteilen, die bei normalen Umgebungsbedingungen eingesetzt werden, nicht die Materialkennwerte von trockenen Proben verwendet werden. Zur Bauteilauslegung müssen idealerweise Kennwerte verwendet werden, die an Proben ermittelt wurden, die gemäß den späteren Einsatz- bzw. Umgebungsbedingungen des Bauteils konditioniert wurden. Bereits die grundsätzliche Charakterisierung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von frischen und luftfeuchten Zugproben in Unterabschnitt 2.6.4 hat gezeigt, dass die mechanischen Eigenschaften der in dieser Arbeit betrachteten Polyamide durch Wasseraufnahme signifikant beeinflusst werden. Aus diesem Grund ist eine grundlegende Untersuchung dieser Einflussgröße notwendig, bevor in Kapitel 6 die Verifizierbarkeit von Simulationsergebnissen durch Prototypversuche an lasergesinterten Bauteilen und in Kapitel 7 der quantitative Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK diskutiert werden kann. Zur Charakterisierung des

quantitativen Einflusses der Wasseraufnahme werden einachsige Zugversuche mit spritz- bzw. sinterfrischen und luftfeuchten Probestäben durchgeführt. Die Vorbereitung der luftfeuchten Probestäbe erfolgte gemäß DIN EN ISO 1110 (siehe Abschnitt 4.4). Die prozentuale Gewichtszunahme der luftfeuchten Probestäbe ist in Tabelle 5.7 dargestellt. Aufgeführt sind sowohl die Angaben aus den Werkstoffdatenblättern als auch die aus der Gewichtszunahme berechnete prozentuale Wasseraufnahme. Zusätzlich wird die prozentuale Gewichtszunahme bei den glaskugelgefüllten Materialien rechnerisch auf den Gewichtsanteil des Matrixanteils bezogen, da lediglich die Polyamid-Matrix Wasser aufnehmen kann.

Tabelle 5.7: Wasseraufnahme der untersuchten Werkstoffe

Fertigung:		Spritzgießen			Selektives Lasersintern	
Werkstoff:		Grilamid L 20 G	Grilamid LKN 3H	Grilamid LKN 5H	PA 2200	PA 3200 GF
Glaskugelanteil:		-	30 %	50 %	-	40 %
Datenblattkennwerte	Feuchtigkeitsaufnahme bei 23 °C/50 % r. F.	0,70 %	0,60 %	0,40 %	k.A.	k.A.
	Wasseraufnahme bei 23 °C/gesättigt	1,50 %	1,20 %	0,80 %	k.A.	k.A.
Datenblattkennw. bezogen auf den Gewichtsanteil der Matrix	Feuchtigkeitsaufnahme bei 23 °C/50 % r. F.	0,70 %	0,86 %	0,80 %	k.A.	k.A.
	Wasseraufnahme bei 23 °C/gesättigt	1,50 %	1,71 %	1,60 %	k.A.	k.A.
Messwerte	Feuchtigkeitsaufnahme bei 70 °C/62 % r. F. (DIN EN ISO 1110)	1,10 %	0,76 %	0,45 %	0,67 %	0,41 %
Messwerte bezogen auf den Gewichtsanteil der Matrix	Feuchtigkeitsaufnahme bei 70 °C/62 % r. F. (DIN EN ISO 1110)	1,10 %	1,09 %	0,90 %	0,67 %	0,68 %

Obwohl der Feuchtegehalt, der durch die beschleunigte Konditionierung gemäß DIN EN ISO 1110 erreicht wird, annähernd dem Gleichgewichtsfeuchtegehalt, der im Normklima 23/50 nach sehr langer Lagerdauer erreicht wird, entspricht (siehe Abschnitt 4.4), ist die prozentuale Wasseraufnahme bei den Spritzgusspolyamiden höher als der im Datenblatt des Materialherstellers für die Lagerung bei Normklima angegebene Wert. Die auf den Gewichtsanteil der Matrix bezogene Wasseraufnahme des Sinterpolyamids beträgt ca. 0,7 % und entspricht damit der Wasseraufnahme, die Baur [8] für PA 12 bei Lagerung in Normklima 23/50 angibt. Ob die höhere Wasseraufnahme des Spritzgusspolyamids einen signifikanten Einfluss auf das Materialverhalten hat, wird in Unterabschnitt 5.3.5 betrachtet.

Die Quantifizierung des Einflusses der Wasseraufnahme erfolgt mithilfe von unterschiedlich dicken Probekörpern und für zwei Prüfgeschwindigkeiten. Zur Absicherung der Schlussfolgerungen wird der Einfluss der Wasseraufnahme anhand von Versuchsergebnissen diskutiert, die an Probestäben von zwei unterschiedlichen Sinterexperten ermittelt wurden. Die jeweiligen Absolutkennwerte sind in Tabelle 10.2 bis Tabelle 10.13 im Anhang aufgeführt. In den ersten drei Unterabschnitten dieses Abschnitts wird der Einfluss der Wasseraufnahme auf die Kennwerte Zug-E-Modul (siehe Unterabschnitt 5.3.1), Zugfestigkeit (siehe Unterabschnitt 5.3.2) und Dehnung bei Zugfestigkeit (siehe Unterabschnitt 5.3.3) analysiert und diskutiert. Zu diesem Zweck wird die prozentuale Veränderung der drei Kennwerte in Diagrammen grafisch dargestellt. Als Bezugsgröße wird jeweils der Kennwert der sinter- bzw. spritzfrischen Probestäbe verwendet. Im Anschluss an die Quantifizierung des Einflusses der Wasseraufnahme auf die Kennwerte des Zugversuchs wird in Unterabschnitt 5.3.4 der Grund für die starke Ausprägung des Wassereinflusses bei glaskugelgefülltem Sinterpolyamid betrachtet.





### 5.3.2 Einfluss der Wasseraufnahme auf die Zugfestigkeit

In Abbildung 5.34 ist die prozentuale Veränderung der Zugfestigkeit grafisch dargestellt. Die Analyse der prozentualen Abnahme durch Wasseraufnahme ergab ein ähnliches Ergebnis wie die zuvor dargestellte Untersuchung zur Beeinflussung des Zug-E-Moduls. Die Zugfestigkeit der glaskugelgefüllten Sinterproben verringert sich durch die Wasseraufnahme in X- und Y-Richtung durchschnittlich um jeweils ca. 42 %. In Z-Richtung weichen die Ergebnisse von zwei Versuchsreihen deutlich von den restlichen sechs Versuchsreihen ab. Ohne die Berücksichtigung dieser Ergebnisse liegt der Rückgang der Zugfestigkeit in Z-Richtung bei ca. 45 %. Wie beim E-Modul zeigt sich auch bei der Zugfestigkeit, dass der prozentuale Abfall bei den gefüllten Sinterproben wesentlich größer ist als bei den ungefüllten Stäben.

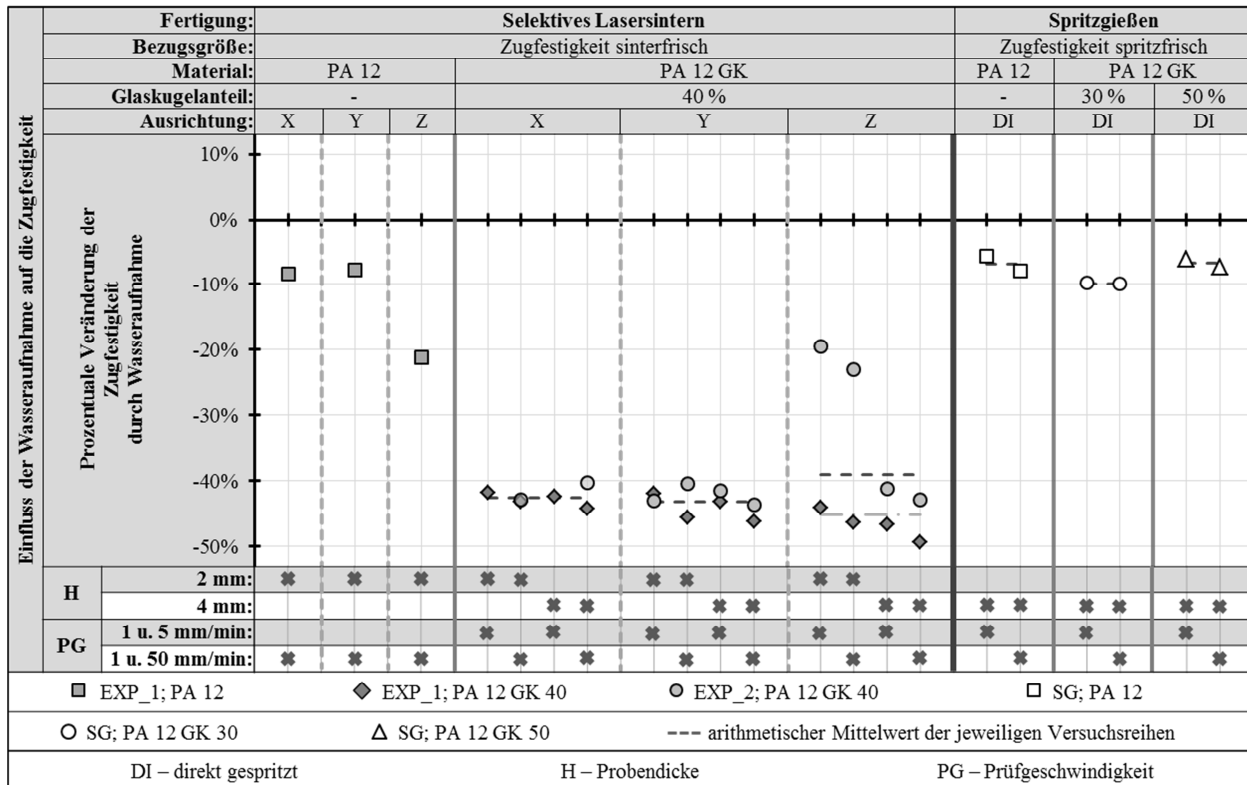


Abbildung 5.34: Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts auf die Zugfestigkeit von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben; dargestellt ist die prozentuale Veränderung zwischen laser- bzw. spritzfrischen und luftfeuchten Probestäben

Die Zugfestigkeit der spritzgegossenen Proben sinkt durch die Feuchtigkeitsaufnahme wesentlich geringer als die der lasergesinterten Stäbe. In allen Versuchsreihen mit spritzgegossenen Probestäben liegt der feuchtigkeitsbedingte Festigkeitsabfall im einstelligen Prozentbereich und damit in einem Bereich, der aufgrund der Datenblattangaben des Materialherstellers sowie Literaturangaben [98] zu erwarten war (Datenblätter siehe [107], [108], [109], [110], [111], [112]). Zusätzlich fällt auf, dass die prozentuale Veränderung der Zugfestigkeit bei den untersuchten Spritzgussmaterialien unabhängig vom Glaskugelanteil annähernd gleich stark ausgeprägt ist. Dies ist bei den Sintermaterialien nicht der Fall. Der große Unterschied zwischen der prozentualen Veränderung der Zugfestigkeit des glaskugelgefüllten Spritzgussmaterials und der des Sintermaterials deutet erneut daraufhin, dass die starke Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften des glaskugelgefüllten Sintermaterials nicht allein auf die feuchtigkeitsbedingte Eigenschaftsveränderung der Polyamid-Matrix zurückzuführen ist. Die genaue Ursache wird in Unterabschnitt 5.3.4 analysiert.

### 5.3.3 Einfluss der Wasseraufnahme auf die Dehnung bei Zugfestigkeit

Auch der Einfluss der Wasseraufnahme auf die Dehnung bei Zugfestigkeit muss berücksichtigt werden, wenn das Verhalten von lasergesinterten Bauteilen aus PA 12 GK korrekt interpretiert werden soll, da die Wasseraufnahme der gesinterten Probestäbe einen massiven Anstieg dieses Kennwerts zur Folge hat. Die Ergebnisse der Auswertung der Versuchsreihen zur Charakterisierung des Einflusses der Wasseraufnahme auf die Dehnung bei Zugfestigkeit sind in Abbildung 5.35 grafisch zusammengefasst. Die Abbildung zeigt, dass die Dehnung bei Zugfestigkeit der ungefüllten Stäbe durch die Wasseraufnahme wesentlich geringer beeinflusst wird als die des glaskugelgefüllten Sinterpolyamids. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der Versuchsreihen mit glaskugelgefüllten Sinterproben stark streuen.

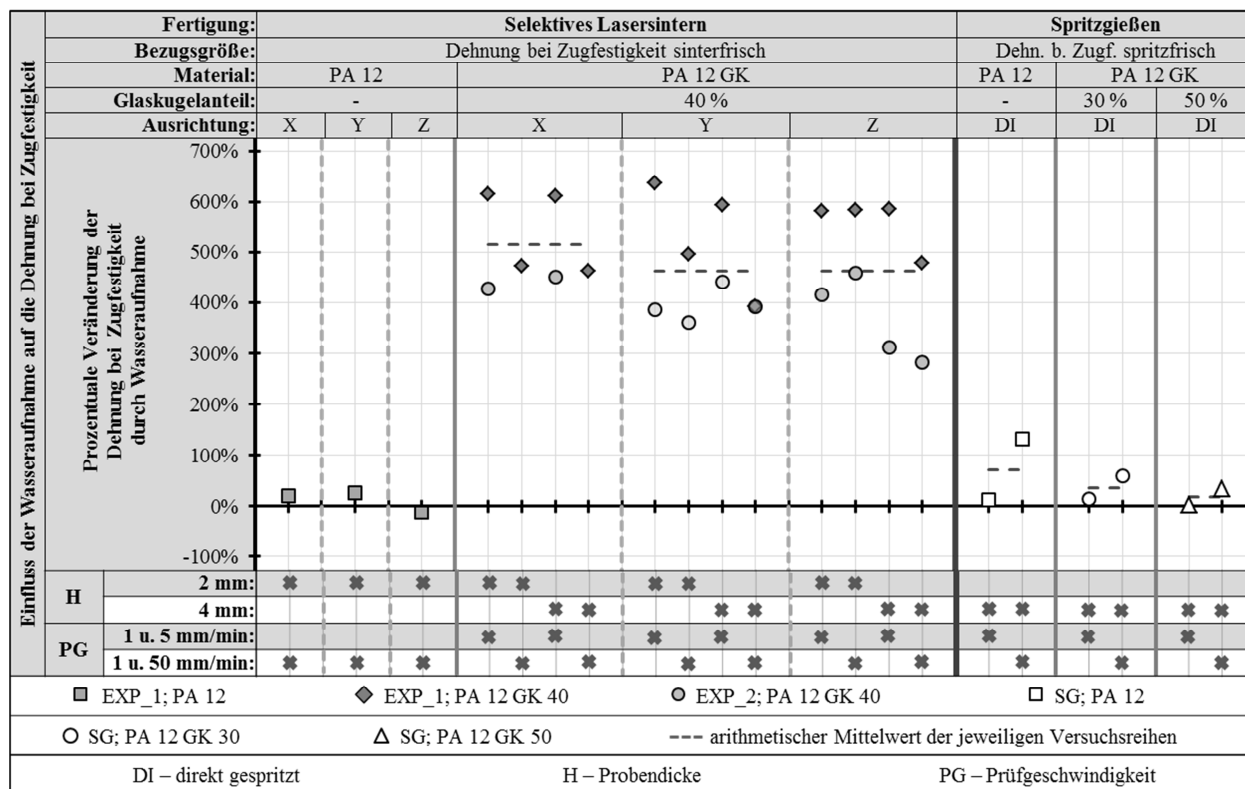


Abbildung 5.35: Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts auf die Dehnung bei Zugfestigkeit von lasergesinterten Probestäben; dargestellt ist die prozentuale Veränderung zwischen laser- bzw. spritzfrischen und luftfeuchten Probestäben

Die Beeinflussung der Dehnung bei Zugfestigkeit der spritzgegossenen Probestäbe ist erheblich geringer als die der lasergesinterten Stäbe. Aufgrund des unerwartet großen Einflusses der Wasseraufnahme auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der gefüllten Sinterproben und die im Vergleich zu den spritzgegossenen Proben zum Teil gegenläufige Beeinflussung werden die Bruchflächen der Sinterproben im folgenden Unterabschnitt mikroskopisch untersucht, um die genauen Gründe für das untypische Verhalten des Sintermaterials zu identifizieren.

### 5.3.4 Stärkere Ausprägung des Wassereinflusses bei glaskugelgefülltem Sinterpolyamid

Bereits bei der Charakterisierung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens in Unterabschnitt 2.6.4 fiel auf, dass die mechanischen Eigenschaften des glaskugelgefüllten Sinterpolyamids wesentlich stärker durch die Wasseraufnahme beeinflusst werden als die des ungefüllten Materials. In Abbildung 5.36 sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven von in X-Richtung orientierten Sinterproben aus ungefülltem und gefülltem Sintermaterial im direkten Vergleich dargestellt.

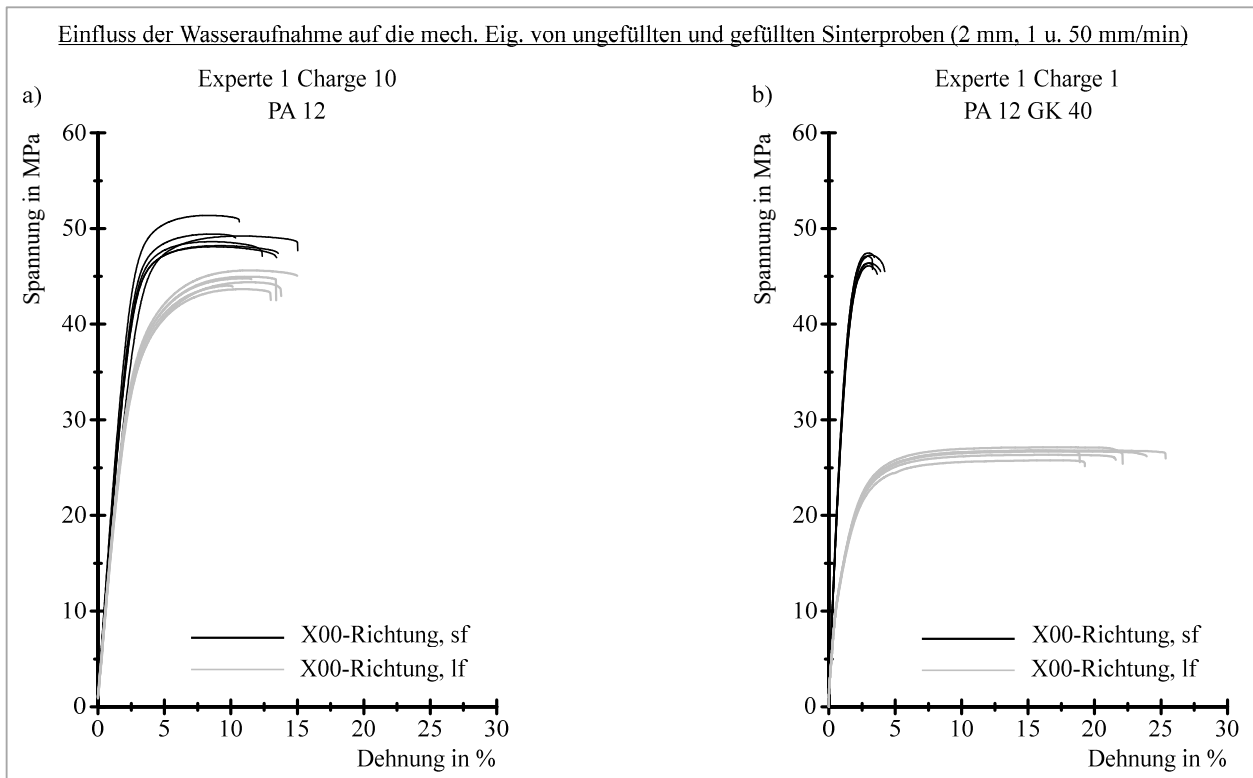


Abbildung 5.36: Spannungs-Dehnungs-Kurven von sinterfrischen und luftfeuchten Sinterproben;  
Diagramm a) PA 12; Diagramm b) PA 12 GK 40

Die sinterfrischen Proben aus glaskugelgefülltem PA 12 besitzen ein eher sprödes Verhalten mit hoher Steifigkeit und geringer Bruchdehnung. Im Vergleich dazu verhalten sich die luftfeuchten Sinterproben aus PA 12 GK 40 deutlich zäher. Sie haben einen geringen E-Modul sowie eine höhere Bruchdehnung als die sinterfrischen Zugproben (Diagramm b) in Abbildung 5.36). Der arithmetische Mittelwert der Zugfestigkeit der glaskugelgefüllten Probestäbe sinkt durch die Wasseraufnahme um 43 %. Bei den ungefüllten Sinterproben hingegen liegt der prozentuale Rückgang der Zugfestigkeit bei lediglich 8 %. Auch der Zug-E-Modul der glaskugelgefüllten Proben sinkt durch die Feuchtigkeitsaufnahme wesentlich stärker als der Modul der ungefüllten Stäbe. Die Verringerung des E-Moduls beträgt beim glaskugelgefüllten Sintermaterial 45 % und beim ungefüllten Werkstoff 15 %. Auch in den anderen Raumrichtungen wird das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der glaskugelgefüllten Probestäbe vergleichbar stark durch die Wasseraufnahme beeinflusst (siehe Abbildung 5.37).

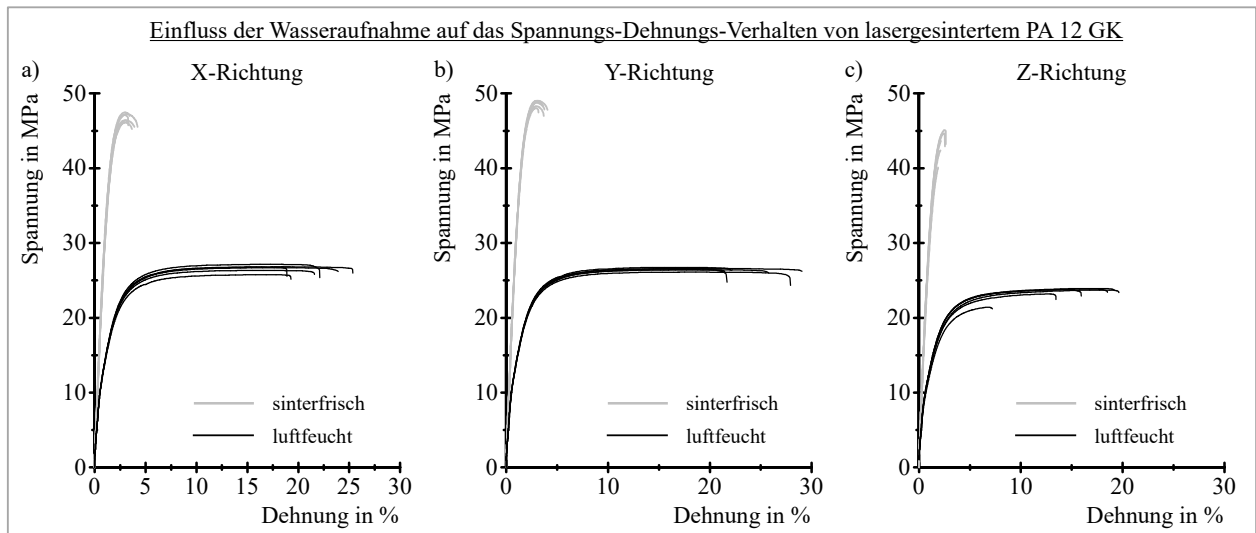


Abbildung 5.37: Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von 2 mm dicken Sinterproben aus PA 12 GK, Prüfgeschwindigkeit 1 und 50 mm/min

Bei den Spritzgussmaterialien ist der Einfluss der Wasseraufnahme auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten sowohl für den ungefüllten als auch für die glaskugelgefüllten Werkstoffe vergleichbar (siehe Abbildung 5.38). Bei der Steifigkeit des Spritzgussmaterials ist im Vergleich zu den Sinterproben sogar ein zum Verhalten der Sinterproben gegenläufiger Effekt feststellbar. Beim Spritzgussmaterial wird der Zug-E-Modul der ungefüllten Proben stärker durch die Wasseraufnahme beeinflusst als der Modul der glaskugelgefüllten Probestäbe.

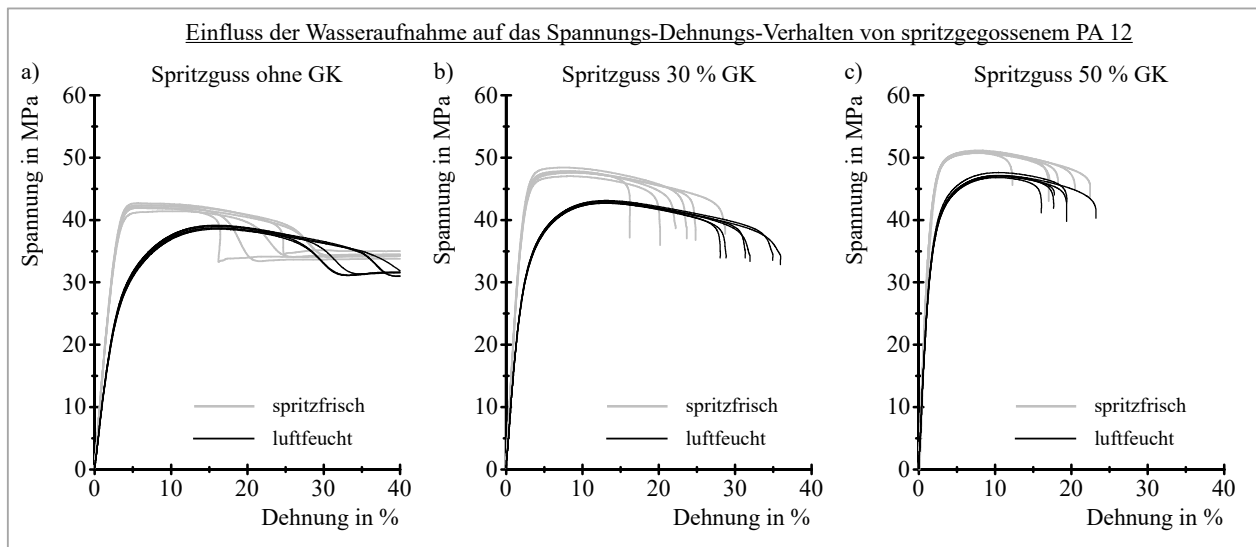


Abbildung 5.38: Einfluss der Wasseraufnahme auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von unterschiedlich stark gefüllten Spritzgussproben aus PA 12; Diagramm a) PA 12 ungefüllt; Diagramm b) PA 12 GK mit 30 % Glaskugeln; Diagramm c) PA 12 GK mit 50 % Glaskugeln

Die Versuchsergebnisse zur Untersuchung des Einflusses der Wasseraufnahme und der direkte Vergleich von Lasersinter- und Spritzgussproben zeigen, dass der Grund für den starken Einfluss der Wasseraufnahme bei den glaskugelgefüllten Sinterproben nicht allein auf die feuchtigkeitstypische Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Polyamid-Matrix zurückzuführen ist. Durch diese für Polyamide typischen Eigenschaftsveränderungen sind Steifigkeits- und Festigkeitsverluste in der Größenordnung, wie sie beim ungefüllten Material vorhanden sind, zu erklären. Dies zeigt auch der direkte Vergleich mit dem Verhalten der Spritzgussmaterialien. Hier ist der Einfluss der Wasseraufnahme bei den gefüllten Stäben

vergleichbar oder sogar weniger stark ausgeprägt als bei den ungefüllten Spritzgussproben (siehe Abbildung 5.38). Aus den genannten Gründen muss es durch die Wasseraufnahme zusätzliche Veränderungen im Inneren der lasergesinterten Stäbe aus PA 12 GK geben. Die Ursache des Steifigkeits- und Festigkeitsabfalls bei den glaskugelgefüllten Sinterproben wird nachfolgend genauer erläutert.

### **Mikroskopische Untersuchungen der Bruchflächen von glaskugelgefüllten Sinterproben**

Bild a) der Abbildung 5.39 zeigt die Bruchfläche eines sinterfrisch gezogenen Probestabs und Bild c) die Bruchfläche einer luftfeucht geprüften Sinterprobe aus PA 12 GK. Das Aussehen der Flächen unterscheidet sich deutlich voneinander. Die sinterfrische Probe versagt vorrangig durch Matrixbruch. In der Bruchfläche sind nur wenige freiliegende Glaskugeln zu erkennen. Es besteht eine Ähnlichkeit zu der Bruchfläche eines Probestabs aus mit Kurzglasfasern verstärktem Material, der ebenfalls durch Matrixbruch versagt hat (Vergleich Bild a) und Bild b) in Abbildung 5.39). Sowohl bei der glaskugelgefüllten Sinterprobe als auch bei der faserverstärkten PA 66 Spritzgießprobe sind die Füllstoffe in der Bruchfläche zum Großteil vollständig mit Matrixmaterial bedeckt. Bei der luftfeuchten Sinterprobe sind deutlich mehr freiliegende Glaskugeln zu erkennen, an deren Oberfläche kaum Matrixmaterial anhaftet. Die unterschiedliche Charakteristik der Bruchflächen zeigt, dass durch die Wasseraufnahme die Kugel-Matrix-Haftung erheblich verschlechtert wird, sodass der Probenbruch im luftfeuchten Zustand durch Grenzflächenversagen eintritt. Auch hier besteht eine Ähnlichkeit zu einer Spritzgießprobe, die durch Herauslösen der Fasern und Faserbruch versagt (Vergleich Bild c) und Bild d) in Abbildung 5.39). In beiden Fällen ist in der Bruchfläche eine große Anzahl von Füllstoffpartikeln (Kugeln bzw. Fasern) zu sehen, die nicht mehr mit Matrixmaterial überdeckt sind.

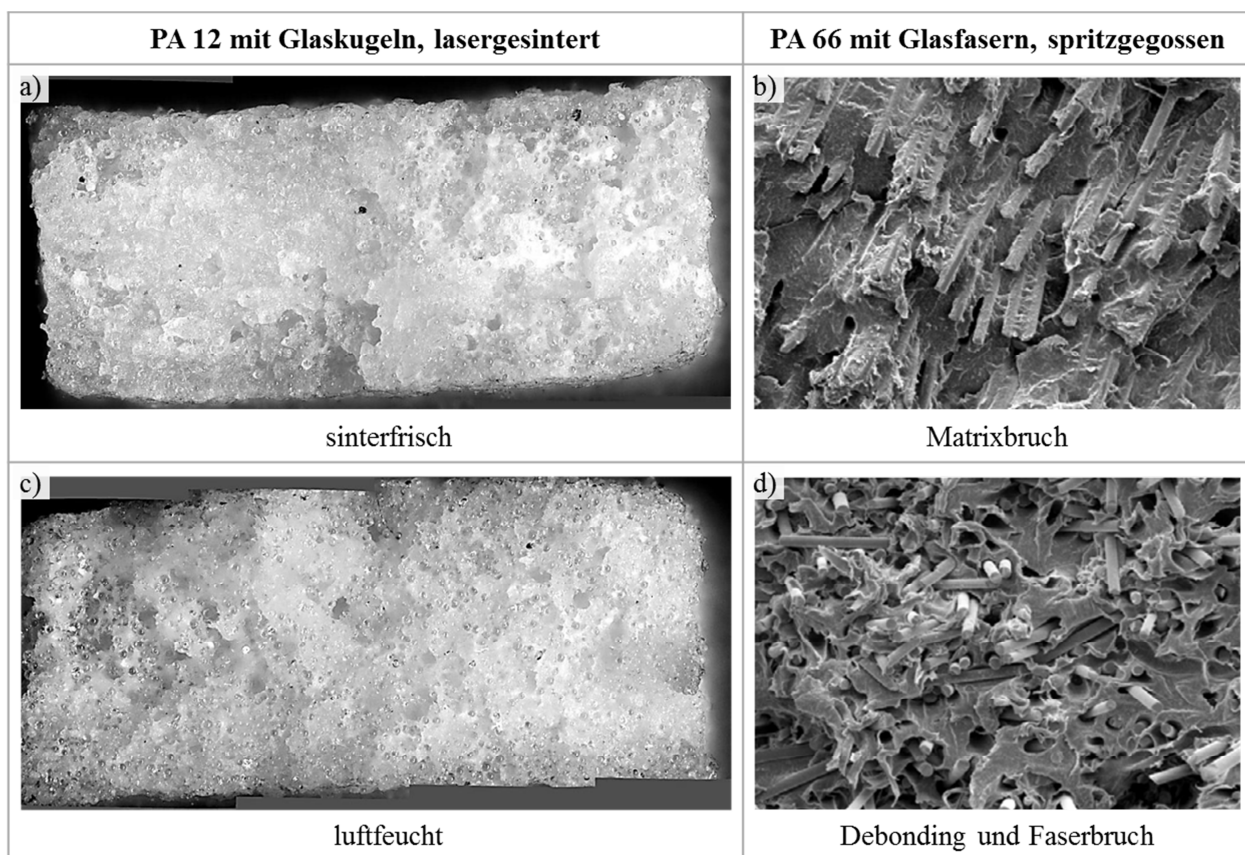


Abbildung 5.39: Vergleich der Bruchfläche von sinterfrischen und luftfeuchten Sinterproben mit Bruchflächen von glasfaserverstärktem PA 66; Quelle der Aufnahmen des glasfaserverstärkten PA 66 [131]

Das unterschiedliche Aussehen der Bruchflächen ist in den Detailaufnahmen (siehe Abbildung 5.40) noch deutlicher zu erkennen. In Bild a) sind die meisten Glaskugeln teilweise oder sogar vollständig mit Matrixmaterial bedeckt. Das Versagen der Probe ist auf einen Matrixbruch und nicht auf das Versagen der Grenzfläche zwischen Kugel und Matrix zurückzuführen. In Bild b) hingegen ist eine Vielzahl von freiliegenden Glaskugeln zu erkennen, an deren Oberseite so gut wie kein Matrixmaterial anhaftet. Des Weiteren zeigen die Bruchflächen jeweils eine andere Topologie. Die Fläche der sinterfrischen Probe ist eher glatt, wohingegen das Matrixmaterial der luftfeuchten Probe in dünnen Fäden aus der Bruchfläche heraussteht (siehe auch Abbildung 10.5 im Anhang auf S. 215). Die Fäden deuten darauf hin, dass sich die Matrix der luftfeuchten Proben im Laufe des Zugversuchs von der Glaskugel löst, um sie herumfließt und verstreckt wird, bevor dann das Versagen des Matrixmaterials eintritt. Durch das Aufbrechen der Grenzfläche zwischen Glaskugel und Matrix können die deutlich geringeren Festigkeitswerte der luftfeuchten Proben erklärt werden. Ohne die Kugel-Matrix-Haftung bildet jede Glaskugel eine Fehlstelle, die den tragenden Querschnitt schwächt. Im Zugversuch ermittelte technische Spannungs-Dehnungs-Kurven stellen Nennspannungen dar (siehe Unterabschnitt 6.2.3), die aus der anliegenden Kraft und dem Nennquerschnitt der Probe berechnet werden. Eine Reduzierung des tragenden Querschnitts durch das Versagen der Grenzfläche wird hierbei nicht berücksichtigt. Lediglich der Kraftabfall wird registriert.

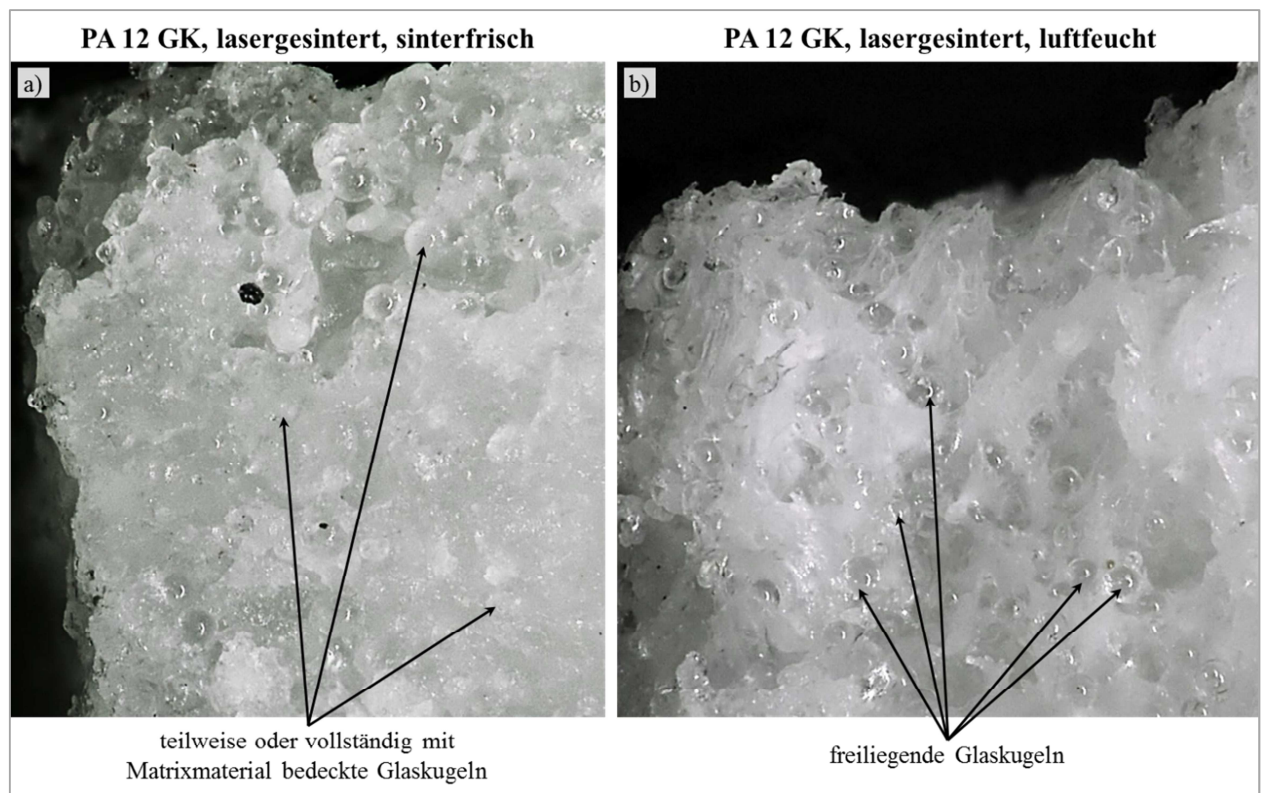


Abbildung 5.40: Detailaufnahmen von der Bruchfläche eines sinterfrisch (linkes Bild) und eines luftfeucht (rechtes Bild) gepöhten Probestabs

Kurr [132] charakterisiert in seinem Buch die Bruchfläche eines Druckbehälters aus Polycarbonat, bei dem sich die Matrix von der Glasfaser löste. Die Oberflächen der Glasfasern (siehe Abbildung 5.41) sind, wie die Glaskugeln der untersuchten Sinterproben, ganz glatt bzw. nur mit sehr wenigen Matrixresten versehen. Kurr [132] sieht darin den Beweis für eine geringe Matrixhaftung der Glasfasern. Als mögliche Ursache führt er ein fehlerhaftes oder falsches Oberflächenfinish (z. B. Silan-Beschichtung siehe Unterabschnitt 5.1.1) der Glasfasern an. Die Beschichtung der eingebrachten Glasfasern oder Glaskugeln soll grundsätzlich eine hohe Kraftübertragung und eine gute Klebeverbindung zwischen Füllstoff und Matrix



bewirken [132]. Wird die Vorbehandlung der Füllstoffe fehlerhaft oder gar nicht vorgenommen, so kann dies zum vorzeitigen Versagen der Grenzfläche zwischen Füllstoff und Polymermatrix führen.

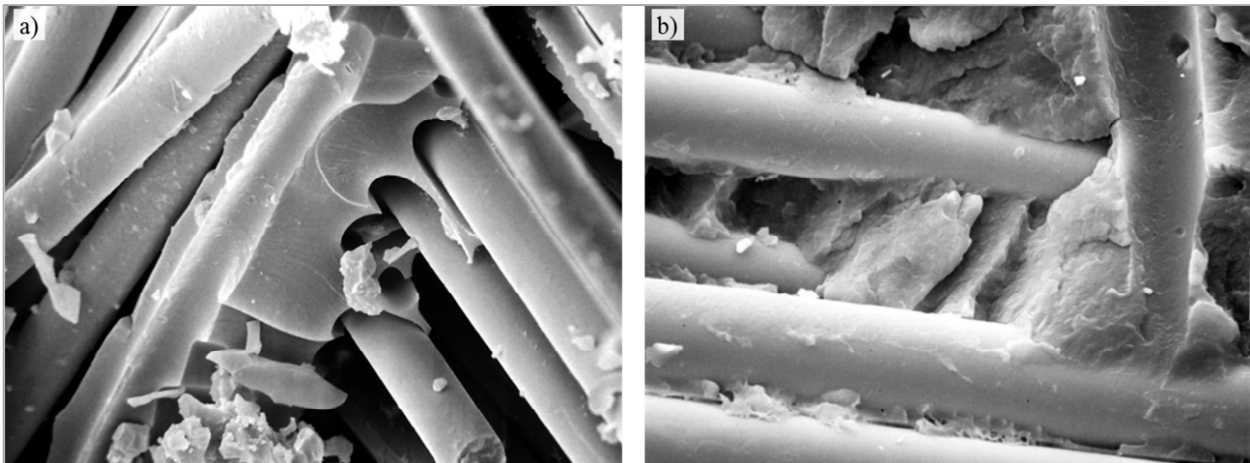


Abbildung 5.41: Bruchflächen von glasfaserverstärkten Bauteilen; Bild a) Matrix löst sich fast vollständig von den Fasern; Bild b) Geringfügig bessere Faser-Matrix-Haftung als in Bild a) [132]

Die direkte Gegenüberstellung der Bruchflächen eines lasergesinterten Probestabs aus PA 12 GK 40 und einer spritzgegossenen Zugprobe aus PA 12 GK 50 in Abbildung 5.42 zeigt, dass in der Bruchfläche des lasergesinterten Stabs trotz des geringeren Füllgrads wesentlich mehr freiliegende Glaskugeln zu sehen sind. Beide Probestäbe wurden im luftfeuchten Zustand zerrissen.

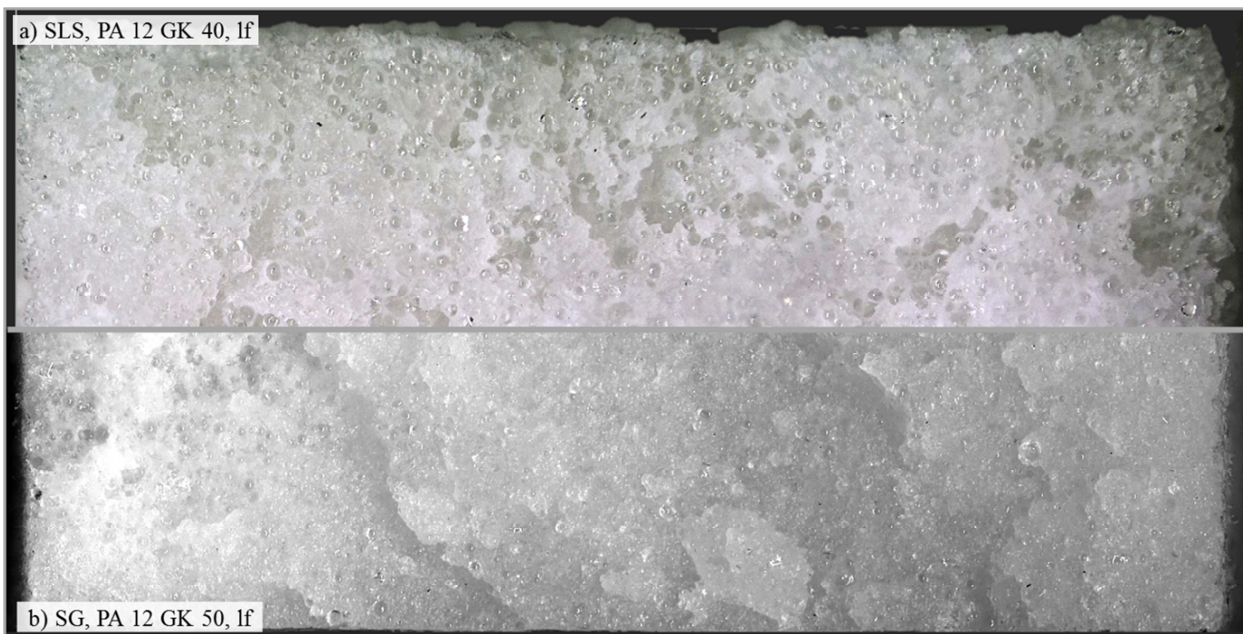


Abbildung 5.42: Gegenüberstellung der Bruchflächen von luftfeuchten Probestäben; Bild a) Lasergesinterner Probestab aus PA 12 GK 40; Bild b) Spritzgegossener Probestab aus PA 12 GK 50

Die große Anzahl freiliegender Glaskugeln bei der Sinterprobe zeigt, dass die Haftung zwischen den Kugeln und der Polyamid-Matrix im luftfeuchten Zustand beim Sintermaterial wesentlich geringer ist als beim Spritzgussmaterial. Durch das Versagen der Grenzfläche kann der große Festigkeitsunterschied zwischen den beiden Materialien im luftfeuchten Zustand erklärt werden. Die Ähnlichkeit der Bruchflächen der luftfeuchten Sinterproben (Bild c) in Abbildung 5.39 und Bild a) Abbildung 5.42) zu den Bruchflächen von glasfaserverstärkten Spritzgießbauteilen, die durch Grenzflächenversagen versagt haben (Bild d) in Abbildung 5.39 und Abbildung 5.41), ist ein weiterer Grund für die Annahme, dass der starke

Einfluss der Wasseraufnahme auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten bei lasergesintertem PA 12 GK auf ein Versagen der Grenzfläche zwischen Glaskugel und Polyamid-Matrix zurückzuführen ist.

### **Simulation des Werkstoffverhaltens von glaskugelgefülltem PA 12 im luftfeuchten Zustand**

Um den Einfluss der Haftung zwischen Glaskugel und Matrix noch genauer zu analysieren, wird nachfolgend der Einfluss von Glaskugeln auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von luftfeuchtem PA 12 mithilfe von Struktursimulationen untersucht. Die Analysen werden an einem repräsentativen Volumenelement (RVE) durchgeführt, das aus einer einzigen Glaskugel und dem dazugehörigen Matrixmaterial besteht (siehe Abbildung 5.43). Die Abmessungen des RVEs werden in Abhängigkeit vom Glaskugelgewichtsteil festgelegt. Die Simulationen werden zum einen für ein RVE aus lasergesintertem PA 12 GK 40 und zum anderen für ein RVE aus spritzgegossenem PA 12 GK 50 durchgeführt.

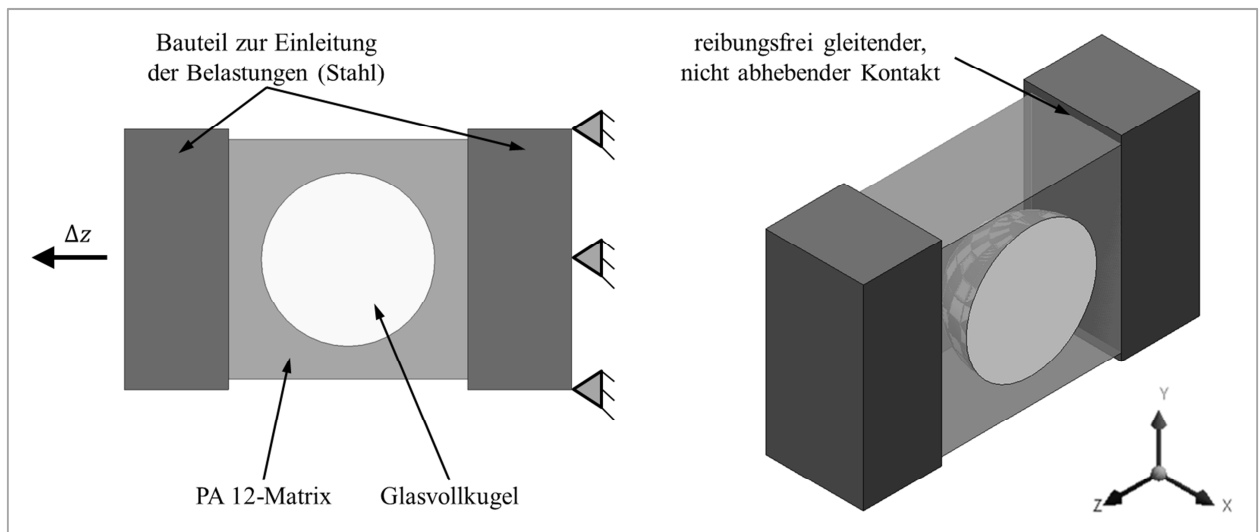


Abbildung 5.43: Schnittdarstellung des repräsentativen Volumenelements (RVE) zur Simulation des Einflusses von Glaskugeln auf das Verhalten von luftfeuchtem PA 12 GK

Das Werkstoffverhalten der Glaskugel wird zur Simulation des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens des RVEs vereinfacht durch ein linear elastisches Materialmodell abgebildet. Der E-Modul der Glaskugel ( $E_{GK}$ ) wird mit  $73\,000\text{ MPa}$  definiert [133]. Die Materialmodelle für die lasergesinterte und die spritzgegossene PA 12-Matrix basieren auf den in Abschnitt 5.1 diskutierten Untersuchungsergebnissen. Mithilfe der Struktursimulation soll das Kurzzeitverhalten des RVEs unter monoton steigender, einmaliger Belastung simuliert werden. Dieser Lastverlauf ist vergleichbar mit der Belastung eines Probestabs im uniaxialen Zugversuch. Aufgrund der kurzzeitigen Belastung wird zur Abbildung des Werkstoffverhaltens der Polyamid-Matrix gemäß Tabelle 6.1 auf Seite 141 ein elastisch-plastisches Materialmodell verwendet. Die im Simulationsprogramm hinterlegten Materialmodelle und die dazugehörigen Spannungs-Dehnungs-Kurven von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben sind in Abbildung 5.44 dargestellt. Das Materialverhalten für das jeweilige Matrixmaterial muss im verwendeten FEM-Simulationsprogramm durch eine wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve definiert werden (siehe Unterabschnitt 6.2.3). Für den direkten Vergleich zwischen Simulation am RVE und Zugversuch am realen Probestab wird nachfolgend allerdings der Verlauf der technischen Spannungen über der technischen Dehnung herangezogen, um den beschriebenen Effekt des Grenzflächenversagens und den damit verbundenen Rückgang der Nennspannung zu verdeutlichen. Die Nennspannung im RVE wird als Quotient aus der in der Simulation aktuell vorhandenen Kraft und der Querschnittsfläche des RVE berechnet (siehe Gleichung (6.2) auf Seite 145).



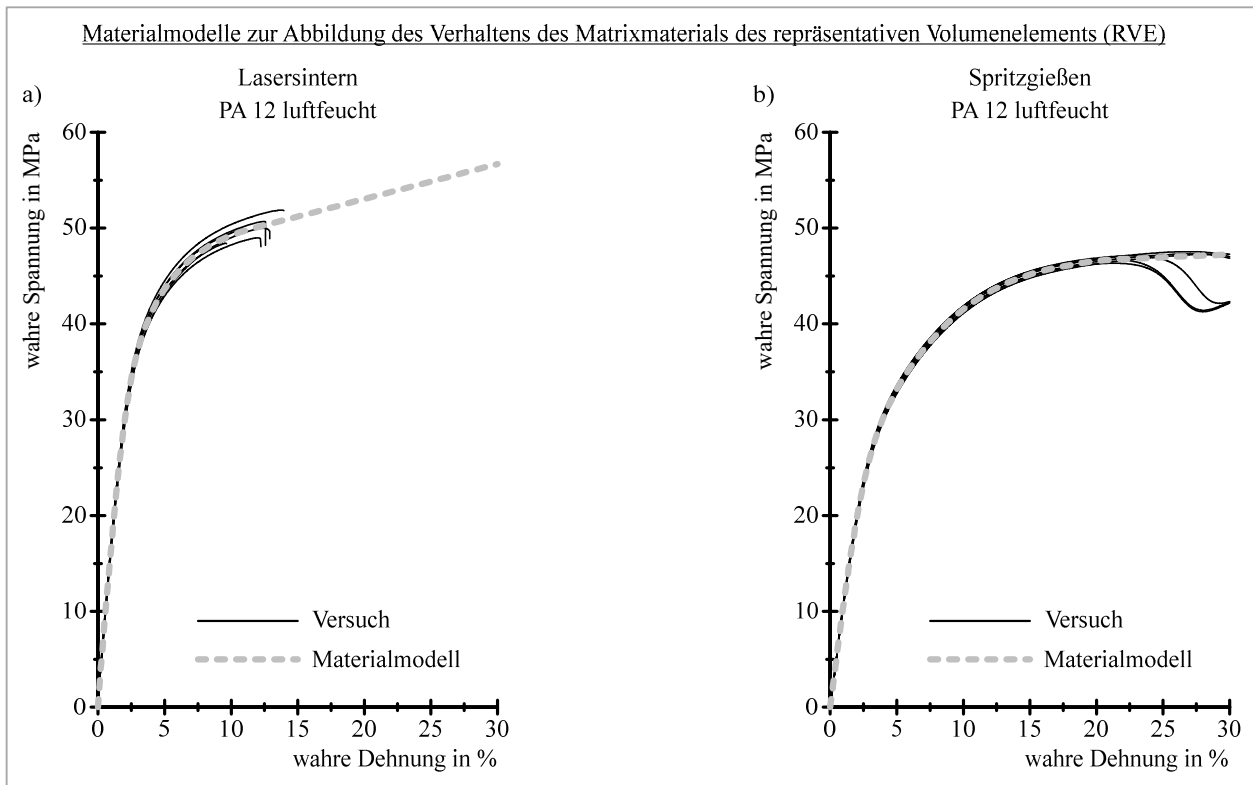


Abbildung 5.44: Materialmodell zur Abbildung des Materialverhaltens Matrixmaterials;  
Diagramm a) Lasergesinterte PA 12-Matrix; Diagramm b) Spritzgegossene PA 12-Matrix

Der simulierte Kurvenverlauf der technischen Spannung im RVE über der technischen Dehnung des RVEs ist in Abbildung 5.45 für das lasergesinterte RVE dargestellt. Das glaskugelgefüllte RVE besitzt einen Glaskugelmassenanteil von 40 %.

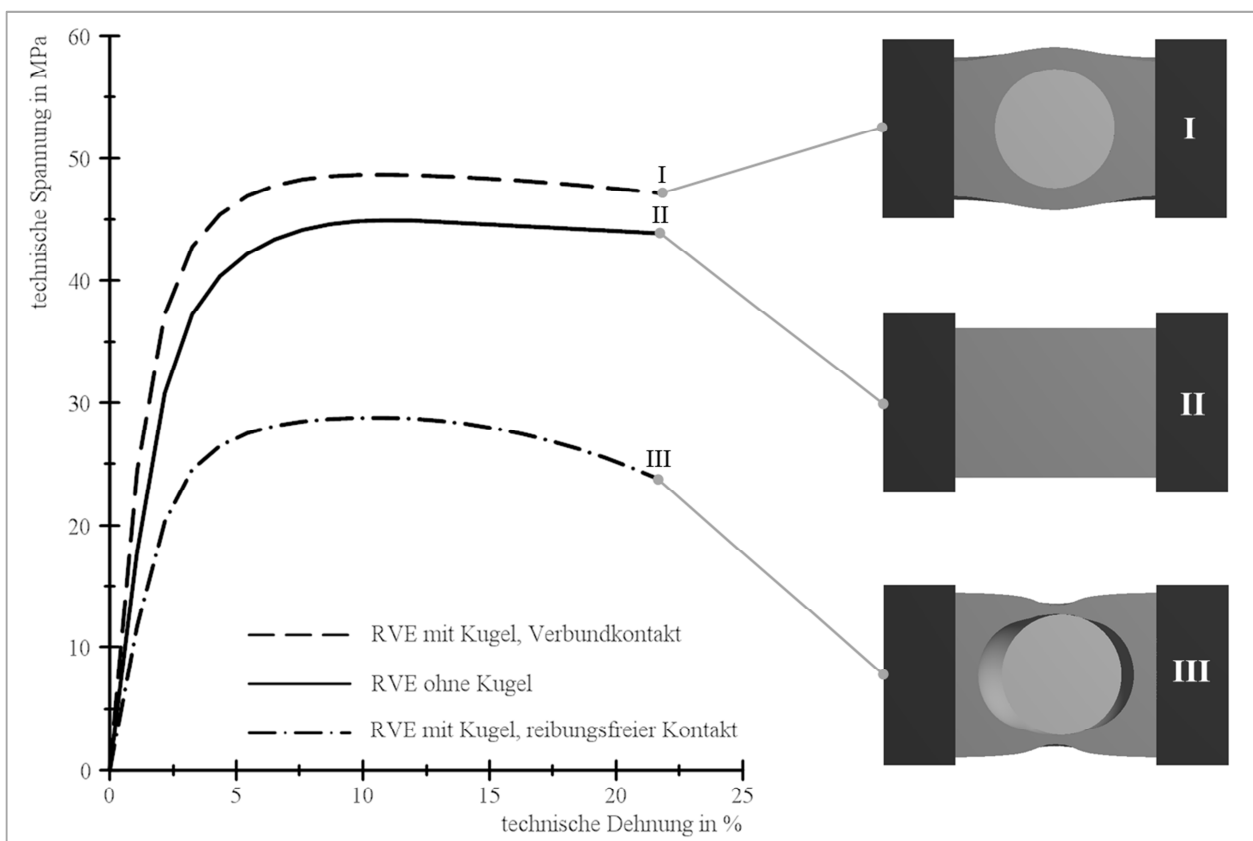


Abbildung 5.45: Spannungs-Dehnungs-Verhalten des RVEs aus lasergesintertem PA 12 mit und ohne Glaskugel

Die mittlere technische Spannungs-Dehnungs-Kurve (Kurve II in Abbildung 5.45) zeigt das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des ungefüllten RVEs aus luftfeuchtem Sinterpolyamid. Mithilfe dieses Kurvenverlaufs kann die Korrektheit der Simulationsrandbedingungen sehr gut verifiziert werden, da sie mit der Spannungs-Dehnungs-Kurve der ungefüllten Probestäbe zusammenfallen muss (siehe Abbildung 5.46). Kurve I zeigt das Verhalten des glaskugelgefüllten RVEs, wenn die Kontaktfläche zwischen Kugeln und Matrix als Verbund definiert wird. Ein Verbundkontakt simuliert eine feste Verbindung zwischen Kugel und Matrix. Sowohl die steifigkeitssteigernde als auch die festigkeitssteigernde Wirkung der Glaskugel sind am Verlauf der Kurve I deutlich zu erkennen. Kurve III der Abbildung 5.45 veranschaulicht das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des RVEs, wenn die Verbindung zwischen Kugel und Matrix durch einen abhebenden, reibungsfreien Kontakt definiert wird. Durch die Wahl dieses Kontakts kann die vom Matrixmaterial vollkommen umhüllte Glaskugel keine Zugkräfte aufnehmen. Sie wird lediglich durch die Deformation die Matrix geringfügig auf Druck beansprucht. Der direkte Vergleich des simulierten Spannungs-Dehnungs-Verhaltens des RVEs und dem Verhalten der realen Zugproben ist in Abbildung 5.46 sowohl für lasergesintertes PA 12 GK 40 als auch für spritzgegossenes PA 12 GK 50 dargestellt.

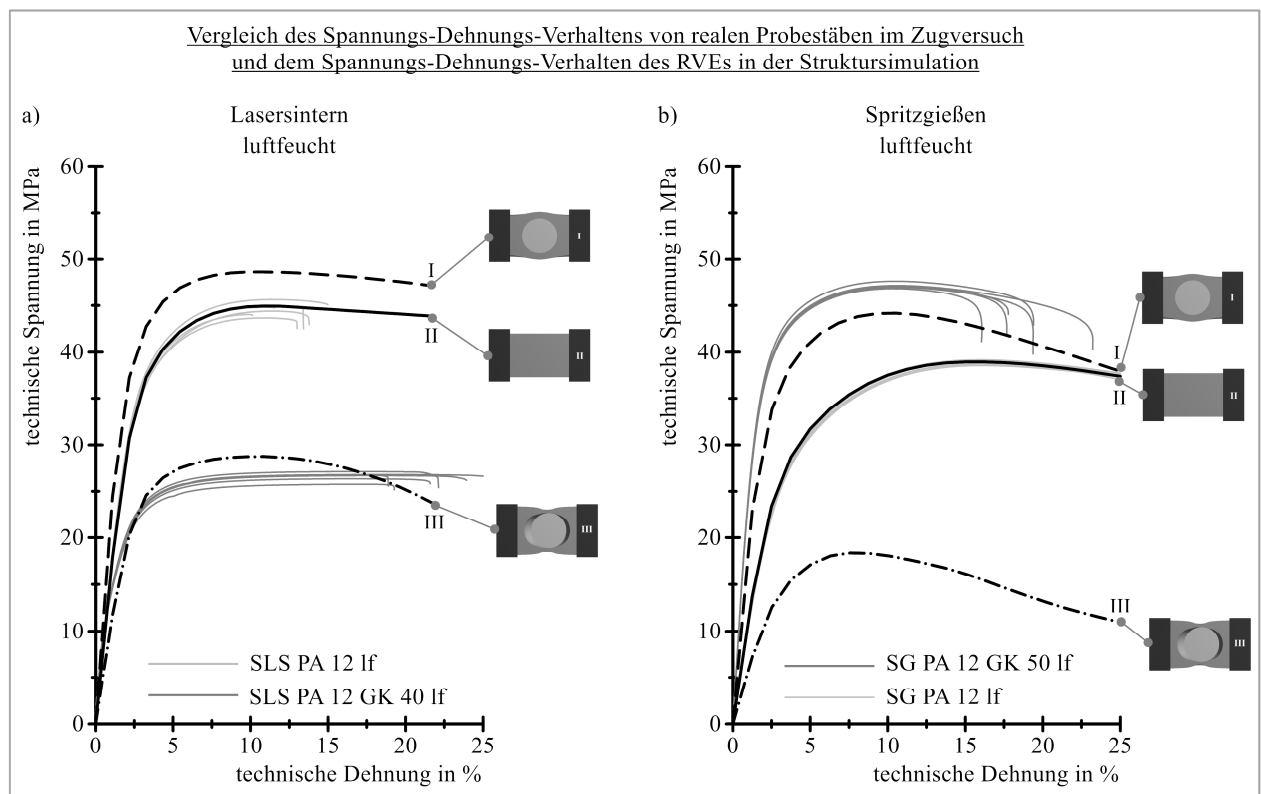


Abbildung 5.46: Gegenüberstellung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Probestäben im Zugversuch und dem Spannungs-Dehnungs-Verhalten des RVEs in der Struktursimulation

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt sehr deutlich, dass das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der luftfeuchten Sinterproben aus PA 12 GK 40 annähernd dem Verhalten des RVEs mit reibungsfreiem Kontakt zwischen Glaskugel und Matrix entspricht (Kurve III in Diagramm a) der Abbildung 5.46). Im Gegensatz dazu liegen die Spannungs-Dehnungs-Kurven der spritzgegossenen Probestäbe aus PA 12 GK 50 sogar noch oberhalb der simulierten Kurve des RVEs mit Verbundkontakt zwischen Kugel und Matrix (Kurve I in Diagramm b) der Abbildung 5.46). Ein Grund für die vorhandenen Abweichungen zwischen Versuch und Simulation ist, dass bei der Analyse des Verhaltens des RVEs lediglich eine Glaskugel in einer quaderförmigen Polymermatrix betrachtet wird. Die mögliche Überlagerung der Wirkung von benachbarten Glaskugeln sowie die ungleichmäßigen Abstände zwischen den einzelnen Kugeln, die

im realen Probestab vorhanden sind, bleiben in der Simulation unberücksichtigt. Auch Hohlräume zwischen mehreren Glaskugeln, wie sie typischerweise bei glaskugelgefüllten Sintermaterialien entstehen können (siehe Abbildung 3.21 auf Seite 58), werden in der Simulation nicht berücksichtigt. Der direkte Vergleich von Versuch und Simulation zeigt trotz der idealisierten Betrachtung des RVEs sehr deutlich, dass die starke Ausprägung des Einflusses der Wasseraufnahme auf die mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten Probestäben aus PA 12 GK 40 auf die feuchtigkeitsbedingte Verringerung der Haftung zwischen Kugel und Matrix zurückzuführen ist. Ein derartiger Effekt ist beim Spritzgussmaterial nicht feststellbar.

### 5.3.5 Auswirkung des Einflusses der erhöhten Wasseraufnahme des Spritzgussmaterials

Aus Tabelle 5.7 auf Seite 106 geht hervor, dass die Spritzgussmaterialien bei der Konditionierung gemäß DIN EN ISO 1110 mehr Wasser aufgenommen haben, als aufgrund der Angaben in den Werkstoffdatenblättern zu erwarten war. Deshalb erfolgt an dieser Stelle ein Abgleich zwischen den Versuchsergebnissen und den bereitgestellten Datenblattkennwerten, um die Auswirkungen der erhöhten Wasseraufnahme zu identifizieren. Die Datenblätter des Materialherstellers enthalten mechanische Kennwerte für zwei Konditionierungszustände. Zum einen sind Angaben für trockene Probestäbe und zum anderen für konditionierte Proben vorhanden. Im Datenblatt fehlt die Angabe, durch welches Verfahren die Proben konditioniert wurden und welcher der genormten Konditionierungszustände (siehe Abschnitt 4.4) den als konditioniert bezeichneten Kennwerten zuzuordnen ist. Nachfolgend wird deshalb davon ausgegangen, dass der als konditioniert gekennzeichnete Zustand dem luftfeuchten Zustand entspricht, da in Datenblättern üblicherweise die Kennwerte für luftfeuchte und nicht für nasse Proben angegeben werden.

Im direkten Vergleich zu den feuchtigkeitsbedingten Veränderungen der mechanischen Eigenschaften, die aus den bereitgestellten Datenblattkennwerten berechnet wurden, sinkt der E-Modul der untersuchten Probestäbe bei allen drei Spritzgussmaterialien stärker als angegeben (siehe Tabelle 5.8). Eine derart eindeutige Tendenz ist jedoch nur beim Zug-E-Modul zu erkennen. Bei der Zugfestigkeit ergeben die Versuche mit den ungefüllten Stäben eine stärkere Beeinflussung, die Versuche mit dem Werkstoff mit 30 % Glaskugeln die gleiche Veränderung und die Untersuchung des Werkstoffs mit 50 % Glaskugeln eine geringere Beeinflussung. Die Versuchsergebnisse der Dehnung bei Zugfestigkeit lagen zweimal über und einmal unter der aus den Datenblattkennwerten berechneten Veränderung.

Tabelle 5.8: Untersuchung des Einflusses der erhöhten Wasseraufnahme

Fertigungsverfahren	Glaskugelanteil	Prozentuale Veränderungen der mechanischen Kennwerte der Spritzgussmaterialien durch den Einfluss der Wasseraufnahme				Quelle
		Ausrichtung	Zug-E-Modul	Zugfestigkeit	Dehnung bei Zugfestigkeit	
SG	-	keine Angabe	-31 %	-2 %	+9 %	DB
		direkt gespritzt	-33 %	-7 %	+72 %	Versuch
SG	30 %	keine Angabe	-16 %	-10 %	+25 %	DB
		direkt gespritzt	-32 %	-10 %	+36 %	Versuch
SG	50 %	keine Angabe	-12 %	-10 %	+40 %	DB
		direkt gespritzt	-20 %	-7 %	+19 %	Versuch
SG	Spritzgießen					
DB	Datenblatt					

Der im Vergleich zum Datenblatt stärkere Rückgang des E-Moduls kann durch die höhere Wasseraufnahme erklärt werden, allerdings müsste dann folgerichtig auch die gemessene Veränderung der Zugfestigkeit größer sein als die aus den Datenblattkennwerten ermittelte Veränderung. Dies ist jedoch nicht der Fall. Aufgrund der fehlenden Angaben zu dem vom Hersteller eingesetzten Konditionierungsverfahren und der nicht normgerechten Bezeichnung des zweiten Konditionierungszustands ist im Rahmen dieser Arbeit keine endgültige Klärung des Einflusses der erhöhten Wasseraufnahme möglich. Die dargestellte Problematik zeigt sehr deutlich, wie wichtig reproduzierbare und eindeutig beschriebene Randbedingungen für den direkten Vergleich von Werkstoffkennwerten sind. Schon kleine Unterschiede bei der Probenvorbehandlung oder unvollständig dokumentierte Randbedingungen führen dazu, dass vorhandene Abweichungen nicht eindeutig interpretiert werden können.

### 5.3.6 Bewertung der Untersuchung des Einflusses der Wasseraufnahme

In Unterabschnitt 2.5.2 wurde bereits erläutert, dass sich die Steifigkeit und Festigkeit von Polyamiden grundsätzlich durch Wasseraufnahme verringert. Sie führt zu einer Vergrößerung der Molekülabstände durch Quellen, da die Wassermoleküle in die Struktur des Polyamids eindiffundieren. Dies hat eine Verringerung der Nebenvalenzkräfte zwischen den einzelnen Makromolekülen zur Folge, da deren Bindungsenergie stark vom Abstand zwischen den Molekülketten beeinflusst wird (siehe Tabelle 2.4 in Abschnitt 2.5). Eine Verringerung der Nebenvalenzkräfte bewirkt, dass die einzelnen Molekülketten leichter aneinander abgleiten können, was zu einer stärkeren Ausprägung der viskoelastischen Eigenschaften führt. Auf diese Weise lassen sich der Rückgang des E-Moduls und der Abfall der Zugfestigkeit erklären. Auch die Zunahme der Dehnung bei Zugfestigkeit kann auf vermehrtes Abgleiten von Molekülketten zurückgeführt werden.

Die Charakterisierung des Einflusses der Wasseraufnahme hat ergeben, dass die prozentuale Veränderung des Zug-E-Moduls und die Verringerung der Zugfestigkeit des glaskugelgefüllten Sinterpolyamids in der gleichen Größenordnung liegen. Beide Kennwerte verringern sich jeweils um mehr als 40 %. Beim Spritzgusspolyamid ist eine derartige Analogie nicht vorhanden, hier wird der Elastizitätsmodul stärker durch die Wasseraufnahme beeinflusst als die Zugfestigkeit. Darüber hinaus hat der direkte Vergleich der prozentualen Veränderung der mechanischen Kennwerte von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK in den Unterabschnitten 5.3.1 bis 5.3.3 gezeigt, dass das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Sinterwerkstoffs wesentlich stärker durch Wasseraufnahme beeinflusst wird als das Verhalten des Spritzgussmaterials. Die Darstellung der zuvor diskutierten Ergebnisse in der Übersicht in Tabelle 5.9 zeigt noch einmal, dass die feuchtigkeitsbedingte Veränderung der mechanischen Eigenschaften bei den Probestäben beider Sinterexperten vergleichbar stark ausgeprägt ist. Bei der Beeinflussung der Dehnung bei Zugfestigkeit sind die vorhandenen Unterschiede zwischen den Proben der beiden Sinterexperten etwas größer, dennoch liegen sie in der gleichen Größenordnung. Dieses Ergebnis zeigt, dass die starke Beeinflussung auf feuchtigkeitsbedingte Veränderungen im Material und nicht auf Fertigungsfehler zurückzuführen ist.

Tabelle 5.9: Ergebnisübersicht zum prozentualen Einfluss der Wasseraufnahme auf die mechanischen Eigenschaften für lasergesintertes und spritzgegossenes PA 12 GK

Fertigungs- verfahren	Glaskugelanteil	Quantifizierung des Einflusses der Wasseraufnahme für PA 12 GK				
		Ausrichtung		Zug-E-Modul	Zugfestigkeit	Dehnung bei Zugfestigkeit
SLS	40 %	X	EXP_1	-44 %	-43 %	+540 %
SLS	40 %	X	EXP_2	-42 %	-42 %	+440 %
SLS	40 %	Y	EXP_1	-44 %	-44 %	+530 %
SLS	40 %	Y	EXP_2	-45 %	-42 %	+395 %
SLS	40 %	Z	EXP_1	-49 %	-47 %	+558 %
SLS	40 %	Z	EXP_2	-43 %	(-32 %) -42 %	+368 %
SG	30 %	direkt gespritzt		-32 %	-10 %	+36 %
SG	50 %	direkt gespritzt		-20 %	-7 %	+19 %
SLS	Selektives Lasersintern					
SG	Spritzgießen					
Bemerkung:	Der Wert in Klammern berücksichtigt die Ergebnisse von stark abweichenden Versuchsreihen					

Zusätzlich zur Quantifizierung des Einflusses der Wasseraufnahme auf die mechanischen Eigenschaften von glaskugelgefülltem PA 12 GK wurde in den vorangegangenen Unterabschnitten immer auch der Einfluss dieses Parameters auf die Eigenschaften von ungefülltem PA 12 diskutiert. Die Versuchsergebnisse zur Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften von ungefülltem Sinter- bzw. Spritzgusspolyamid durch Wasseraufnahme sind in Tabelle 5.10 in der Übersicht dargestellt.

Tabelle 5.10: Ergebnisübersicht zum prozentualen Einfluss der Wasseraufnahme auf die mechanischen Eigenschaften bei lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12

Fertigungs- verfahren	Glaskugelanteil	Quantifizierung des Einflusses der Wasseraufnahme für PA 12 GK				
		Ausrichtung		Zug-E-Modul	Zugfestigkeit	Dehnung bei Zugfestigkeit
SLS	-	X	EXP_1	-15 %	-8 %	+20 %
SLS	-	Y	EXP_1	-17 %	-8 %	+27 %
SLS	-	Z	EXP_1	-16 %	-21 %	-13 %
SG	-	direkt gespritzt		-33 %	-7 %	+72 %
SLS	Selektives Lasersintern					
SG	Spritzgießen					

### **Bedeutung der Versuchsergebnisse für die vorliegende Arbeit**

Die Quantifizierung des Einflusses der Wasseraufnahme verdeutlicht, dass sie zum Teil sehr starken Einfluss auf das Verhalten von lasergesinterten und spritzgegossenen Polyamiden hat. Aus diesem Grund muss der Konditionierungszustand bei der Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs (siehe Kapitel 7) zwischen dem Verhalten eines Sinter- und eines Spritzgussbauteils unbedingt berücksichtigt werden. Eine Nichtberücksichtigung macht eine quantitative Bewertung von Belastungsversuchen, die an lasergesinterten Prototypen durchgeführt wurden, nahezu unmöglich. Auch der Einsatz von lasergesinterten Prototypen zur Verifikation von Simulationsergebnissen (siehe Kapitel 6) ist nur möglich, wenn die Materialkennwerte, die zur Erstellung des Materialmodells für die Struktursimulation eingesetzt werden, mit Proben ermittelt werden, die denselben Feuchtigkeitsgehalt aufweisen, wie das zu untersuchende

Bauteil. Die dargestellten Untersuchungsergebnisse widersprechen der Annahme von Breuninger [22], dass der Feuchteinfluss auf Sinter Teile gering ist und aufgrund der Berücksichtigung von allgemeinen Sicherheitsfaktoren bei der Bauteilauslegung unberücksichtigt bleiben kann. Dies gilt insbesondere für glaskugelgefülltes Sinterpolyamid.

Als Konsequenz aus dieser wissenschaftlichen Untersuchung des quantitativen Einflusses der Wasseraufnahme auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Sinterpolyamiden sollte in den Datenblättern von Sinterwerkstoffen der Konditionierungszustand der Probe zwingend angegeben werden, da die Kennwerte sonst keine bzw. eine nur eine sehr geringe Aussagekraft besitzen. Im Gegensatz zu den Datenblättern von Spritzgießwerkstoffen, bei denen sich die Angabe des Konditionierungszustands weitestgehend durchgesetzt hat, ist dies bei Sinterpolyamiden aktuell noch nicht der Fall (siehe [11] [12] [134]). In diesem Punkt besteht dringender Handlungsbedarf seitens der Materialhersteller. Ohne die Angabe des Konditionierungszustands ist ein direkter Vergleich der mechanischen Eigenschaften von unterschiedlichen Werkstoffen anhand von Datenblattkennwerten nicht möglich.

#### 5.4 Charakterisierung des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit

Die mechanischen Eigenschaften von Polymeren sind aufgrund des nicht linear viskoelastischen Materialverhaltens dieser Werkstoffe abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit (siehe Unterabschnitt 2.5.3). Zur Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs (siehe Kapitel 7) zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten und spritzgegossenen Kunststoffbauteilen ist es wichtig, die Ausprägung des Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit für beide Werkstoffe zu kennen. Aus diesem Grund wird der quantitative Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 in diesem Abschnitt der vorliegenden Arbeit mithilfe von Zugversuchen analysiert. Abbildung 5.47 und Abbildung 5.48 zeigen die Spannungs-Dehnungs-Kurven von ungefüllten sowie glaskugelgefüllten Probestäben, die mit zwei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten ermittelt wurden.

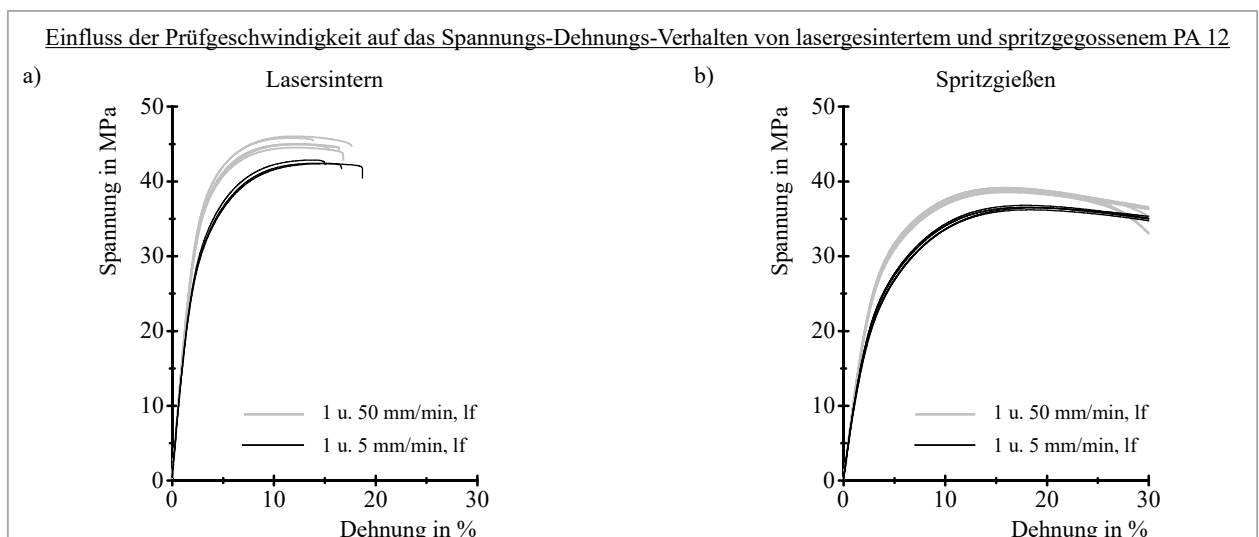


Abbildung 5.47: Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Spannungs-Dehnungs-Kurven von ungefüllten, luftfeuchten Lasersinter- und Spritzgussproben

In den Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass eine Verzehnfachung der Prüfgeschwindigkeit sowohl bei den ungefüllten Werkstoffen (siehe Abbildung 5.47) als auch bei den glaskugelgefüllten Materialien (siehe Abbildung 5.48) den erwarteten Anstieg der Steifigkeit und Zugfestigkeit bewirkt. Beide Effekte

sind bei den lasergesinterten und den spritzgegossenen Probestäben gut zu erkennen. Weiterhin ist zu sehen, dass sich die Dehnung bei Zugfestigkeit durch die Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit verringert.

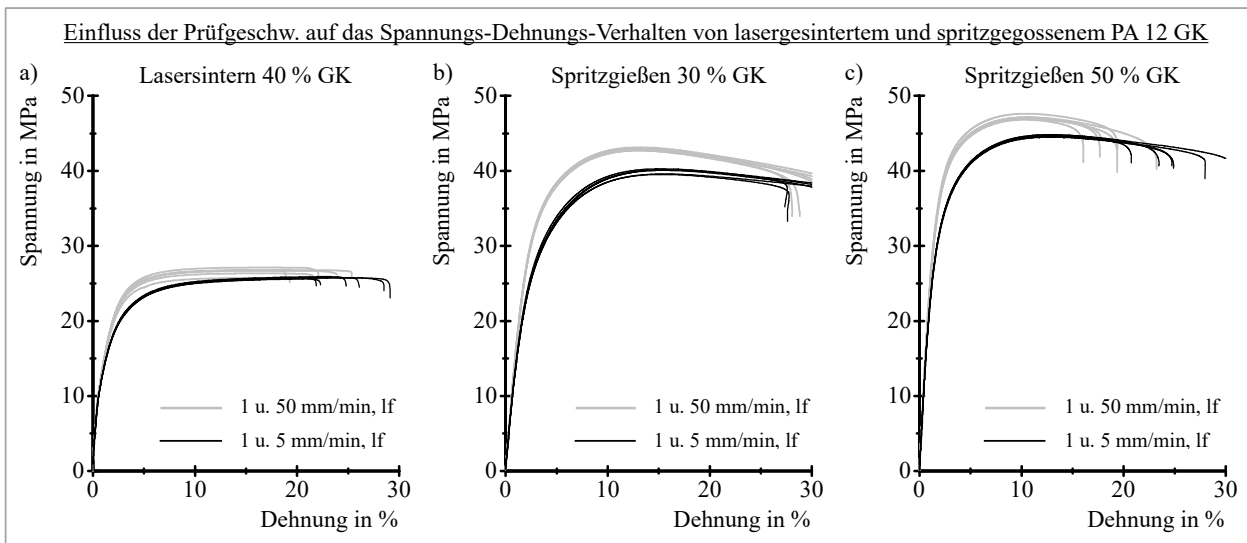


Abbildung 5.48: Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Spannungs-Dehnungs-Kurven von glaskugelgefüllten, luftfeuchten Lasersinter- und Spritzgussproben

Der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit wird nachfolgend anhand von Auswertungen für unterschiedliche Probenausrichtungen und zwei Probendicken ausführlich diskutiert. Die ermittelten Absolutkennwerte sind in Tabelle 10.14 bis Tabelle 10.25 im Anhang aufgeführt. Der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf den E-Modul wird nicht genauer untersucht. Die Modulbestimmung erfolgt in allen Versuchen mit der in der DIN EN ISO 527 vorgeschriebenen Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min. Die geringen prozentualen Veränderungen des E-Moduls, die in Tabelle 10.14 bis Tabelle 10.17 zu erkennen sind, ergeben sich aus den unterschiedlichen Versuchsreihen und sind durch die normale Streuung von Versuchsergebnissen zu begründen.

#### 5.4.1 Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Zugfestigkeit

In Abbildung 5.49 sind die Versuchsergebnisse zur Beeinflussung der Zugfestigkeit von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 durch die Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit dargestellt. Die Auswertung zeigt, dass der prozentuale Einfluss auf die Zugfestigkeit bei einer Verzehnfachung der Prüfgeschwindigkeit bei fast allen Versuchsreihen im einstelligen Prozentbereich liegt. Lediglich zwei Versuchsreihen mit spritzgegossenen Probestäben ergeben eine niedrige zweistellige prozentuale Veränderung.

Die Zugfestigkeit der luftfeuchten Sinterproben steigt durchschnittlich um ca. 5 %, wenn der Rückgang in Z-Richtung bei den ungefüllten Stäben nicht berücksichtigt wird. Die prozentuale Veränderung der Zugfestigkeit durch die Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit ist für glaskugelgefülltes und ungefülltes Sinterpolyamid in X- und Y-Richtung vergleichbar. In Z-Richtung hingegen ergeben die Versuche an den ungefüllten Stäben einen Abfall und bei den gefüllten einen Anstieg der Zugfestigkeit. Die nicht plausiblen Versuchsergebnisse der ungefüllten Z-Proben sind, wie oben bereits erläutert (siehe Unterabschnitt 5.1.2), auf Unregelmäßigkeiten im Sinterprozess zurückzuführen.

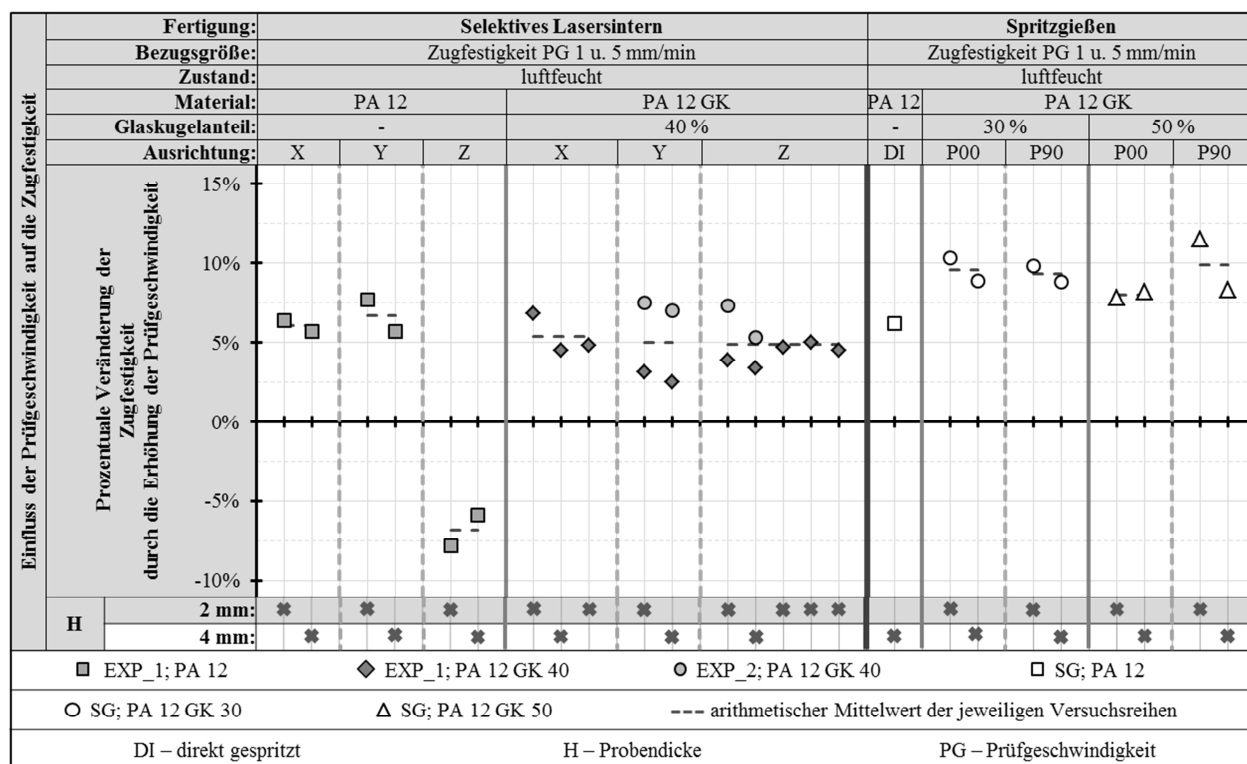


Abbildung 5.49: Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Zugfestigkeit von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben aus PA 12

Die Zugfestigkeit der spritzgegossenen Proben steigt durch die Verzehnfachung der Prüfgeschwindigkeit durchschnittlich um ca. 9 % und damit tendenziell etwas stärker als die der Sinterproben. Die Richtung der Beeinflussung der Zugfestigkeit und die Größenordnung der prozentualen Veränderung sind für lasergesintertes und spritzgegossenes PA 12 allerdings gleich. Die Unterschiede in der Ausprägung des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit liegen in den durchgeführten Versuchsreihen im einstelligen Prozentbereich. Deshalb sind sie für die grundlegende Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs zwischen der Festigkeit von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK von untergeordneter Bedeutung.

#### 5.4.2 Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Dehnung bei Zugfestigkeit

Die grafische Darstellung der ermittelten Ergebnisse in Abbildung 5.50 zeigt, dass die prozentuale Veränderung der Zugfestigkeit größer ist als der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Zugfestigkeit (Vergleich Abbildung 5.49 und Abbildung 5.50). Der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Dehnung bei Zugfestigkeit ist bei den gefüllten und den ungefüllten Sinterproben vergleichbar ausgeprägt. Lediglich bei den glaskugelgefüllten Z-Proben ist die prozentuale Veränderung geringer als bei den restlichen Versuchsreihen. Der Grund für die geringere Beeinflussung von in Baurichtung orientierten Stäben ist deren schichtweiser Aufbau in Belastungsrichtung, der ein Abgleiten von Molekülketten nur eingeschränkt ermöglicht, bevor die Probe versagt.



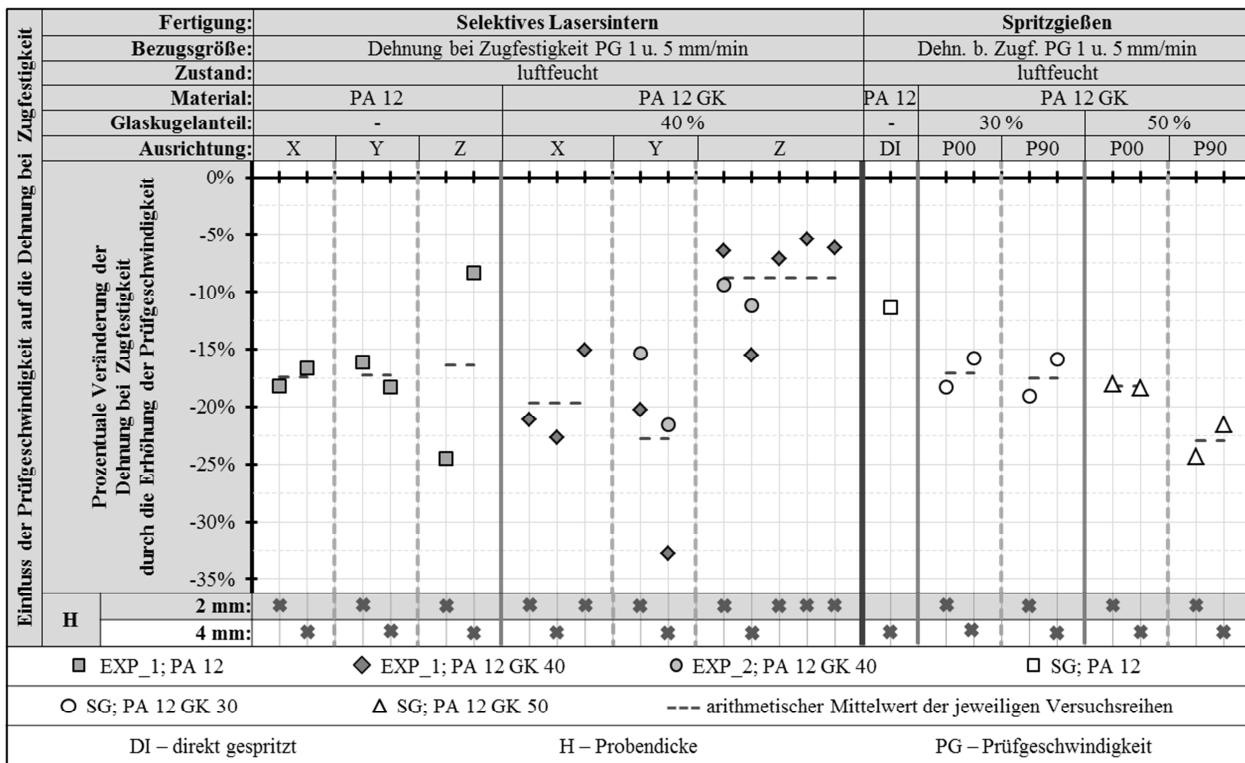


Abbildung 5.50 Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Dehnung bei Zugfestigkeit von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben aus PA 12

Im luftfeuchten Zustand sinkt die Dehnung bei Zugfestigkeit der glaskugelgefüllten Stäbe in X- und Y-Richtung relativ deutlich. Auffällig ist das Ergebnis der einen Versuchsreihe mit einer prozentualen Veränderung von mehr als -30 %. Ohne die Berücksichtigung dieses Werts liegt der Rückgang der Dehnung bei Zugfestigkeit in X- und Y-Richtung zwischen 15 und 25 % und in Z-Richtung zwischen 5 und 15 %. Der direkte Vergleich der Ergebnisse der Versuchsreihen der Sinterproben mit den Spritzgussproben zeigt, dass der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Dehnung bei Zugfestigkeit bei beiden Werkstoffen trotz der unterschiedlichen Verarbeitungsverfahren vergleichbar stark ausgeprägt ist.

### 5.4.3 Bewertung der Untersuchung des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von thermoplastischen Polymeren zeigt aufgrund des zeitabhängigen viskoelastischen Materialverhaltens immer eine gewisse Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit (siehe Unterabschnitt 2.5.3), da die Molekülketten bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten weniger Zeit haben, aneinander abzugleiten. Die Versuchsergebnisse belegen, dass die prozentuale Veränderung von Zugfestigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit bei einer Verzehnfachung der Prüfgeschwindigkeit bei lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 vergleichbar stark ausgeprägt ist. Eine Verzehnfachung der Prüfgeschwindigkeit führt bei beiden Werkstoffen zu einem Anstieg der Zugfestigkeit und einer Abnahme der Dehnung bei Zugfestigkeit in gleicher Größenordnung (siehe Tabelle 5.11). Beim direkten Vergleich von Werkstoffkennwerten und bei der Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 müssen aufgrund der Abhängigkeit des Werkstoffverhaltens von der Belastungsgeschwindigkeit Versuchsergebnisse miteinander verglichen werden, die bei gleichen Prüfgeschwindigkeiten ermittelt wurden.



## 5.5 Charakterisierung des Einflusses der Dicke des Probestabs

In Unterabschnitt 3.3.2 wurde erläutert, dass die Bauteilgeometrie bzw. insbesondere die Wanddicke Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines Sinterteils hat. Auch die mechanischen Eigenschaften von Spritzgießbauteilen werden durch die Probekörperdicke beeinflusst. Allerdings ist über die Zusammenhänge zwischen Wanddicke und den resultierenden inneren und äußeren Bauteileigenschaften bislang nur wenig bekannt. Beispielsweise haben spritzgegossene Filmgelenke eine umso höhere Festigkeit und Lebensdauer, je dicker die Randschicht aus in Fließrichtung orientierten Molekülen und je ausgeprägter die Molekülorientierung ist. Jedoch geht aus der Fachliteratur nicht hervor, ob und wenn ja wie sich diese Erkenntnisse auf Bauteile anderen Wanddicken übertragen lassen. Zur Charakterisierung des Einflusses der Wanddicke auf die mechanischen Eigenschaften von spritzgegossenen Kunststoffbauteilen gibt es nur vereinzelte und wenig systematische Untersuchungen [114]. Gleiches gilt für lasergesinterte Bauteile.

Haberstroh [135] hat in seiner Untersuchung unterschiedlich große Spritzgussproben mit unterschiedlichen Dicken untersucht. Dabei konnte er aber keine systematische Beeinflussung der Zugfestigkeit identifizieren, die eindeutig auf die Größe und Dicke des Probestabs zurückzuführen ist. Für Polypropylen (PP) hat er beispielsweise einen kontinuierlichen Anstieg der Streckspannung mit kleiner und dünner werdenden Probekörpern festgestellt. Bei Polyoxymethylen (POM) hingegen bleibt die Streckspannung bei den drei größeren Probekörpern auf gleichem Niveau und fällt erst beim kleinsten leicht ab. Für PA, das auch im Rahmen der vorliegenden Dissertation betrachtet wird, hat er eine kontinuierliche Abnahme der Streckspannung mit kleiner und dünner werdenden Probekörpern festgestellt. Diese drei Ergebnisse zeigen die unterschiedliche und teilweise sogar gegensätzliche Ausprägung des Einflusses der Probengeometrie [135]. Vordermann [114] beschreibt ebenfalls Untersuchungen, in denen das Spannungs-Dehnungsverhalten von unterschiedlich dicken Spritzgussproben des Typs 1A analysiert wurde. Für POM und PP hat er einen kontinuierlichen Anstieg des E-Moduls bei dünner werdenden Probestäben nachgewiesen [114]. Die in der Literatur vorhandenen Versuchsergebnisse für spritzgegossene Probestäbe sind jedoch in der Regel nicht direkt vergleichbar, da die jeweiligen Fertigungs- und Prüfungsrandbedingungen voneinander abweichen. Dies wird bereits an den zuvor dargestellten Ergebnissen von Haberstroh [135] und Vordermann [114] deutlich und zeigt erneut, wie wichtig eine systematische und einheitliche Vorgehensweise bei der Untersuchung und dem Vergleich der Eigenschaften von Polymerwerkstoffen ist.

Für lasergesintertes Polyamid gibt es erste Untersuchungen zur Quantifizierung der Dickenabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften. Breuninger [22] beschreibt in seinem Buch Untersuchungen, in denen die Abhängigkeit des E-Moduls von der Probekörperdicke analysiert wurde. Durchgeführt wurden die Prüfungen mit trockenen Sinterproben unterschiedlicher Dicke. Der E-Modul schwankte in den Versuchen zwischen 1203 MPa und 1870 MPa, wobei die dicksten Proben den höchsten Modul aufweisen [22].

### 5.5.1 Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Probekörperdicke

Die Wanddicke beeinflusst sowohl bei lasergesinterten als auch bei spritzgegossenen Kunststoffbauteilen die Abkühlgeschwindigkeit im Bauteilinneren. Dadurch wird bei teilkristallinen Werkstoffen, wie dem in dieser Arbeit untersuchten PA 12, der Kristallisationsgrad beeinflusst. Hohe Abkühlraten führen zu einem geringen Kristallisationsgrad. Bei Spritzgießteilen werden durch die Wanddicke zusätzlich zu den Abkühlbedingungen auch die Strömungsverhältnisse, die zur Orientierung von Molekülketten führen können, beeinflusst (siehe Unterabschnitt 5.2.1). Ein Ansteigen von E-Modul und Festigkeit sowie ein Rück-

gang der Streckdehnung mit abnehmender Wandstärke kann bei Spritzgießproben durch die höhere Orientierung der Molekülketten, die sich aufgrund der höheren Scherung bei der Formfüllung ergibt, erklärt werden. Außerdem frieren die verstreckten Molekülketten bei dünneren Probestäben schneller in ihrer Zwangslage ein, da die Abkühlgeschwindigkeit höher ist als bei dickeren Bauteilen. Bei teilkristallinen Thermoplasten bewirkt eine hohe Abkühlgeschwindigkeit einen geringeren Kristallisationsgrad, der wiederum zu niedrigeren mechanischen Eigenschaften führt. Aufgrund der zwei beschriebenen Phänomene, welche die mechanischen Eigenschaften von Spritzgießbauteilen aus teilkristallinen Thermoplasten gegenläufig beeinflussen, ist der Einfluss der Probekörperdicke nicht eindeutig vorhersehbar [114].

Um den Einfluss der Probestabdicke für lasergesintertes und spritzgegossenes PA 12 zu quantifizieren, werden Probestäbe der Form 1BA in 2 und 4 mm Dicke hergestellt und geprüft. In Abbildung 5.51 sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben aus PA 12 GK mit einer Dicke von 2 bzw. 4 mm dargestellt. An den Kurvenverläufen der Sinterproben (Diagramm a) in Abbildung 5.51) ist zu erkennen, dass die dickeren Probestäbe eine höhere Zugfestigkeit erreichen. Darüber hinaus zeigt der geringfügig steilere Kurvenverlauf, dass die dickeren Proben ebenfalls eine höhere Steifigkeit besitzen. Auch die Kurvenverläufe der spritzgegossenen Probestäbe zeigen eine Abhängigkeit von der Dicke des Probestabs. Sowohl die 4 mm dicken P00-Probestäbe aus PA 12 GK 30 (Diagramm b) in Abbildung 5.51) als auch die Proben aus PA 12 GK 30 (Diagramm c) in Abbildung 5.51) erreichen eine höhere Zugfestigkeit als die dünnen Spritzgießproben.

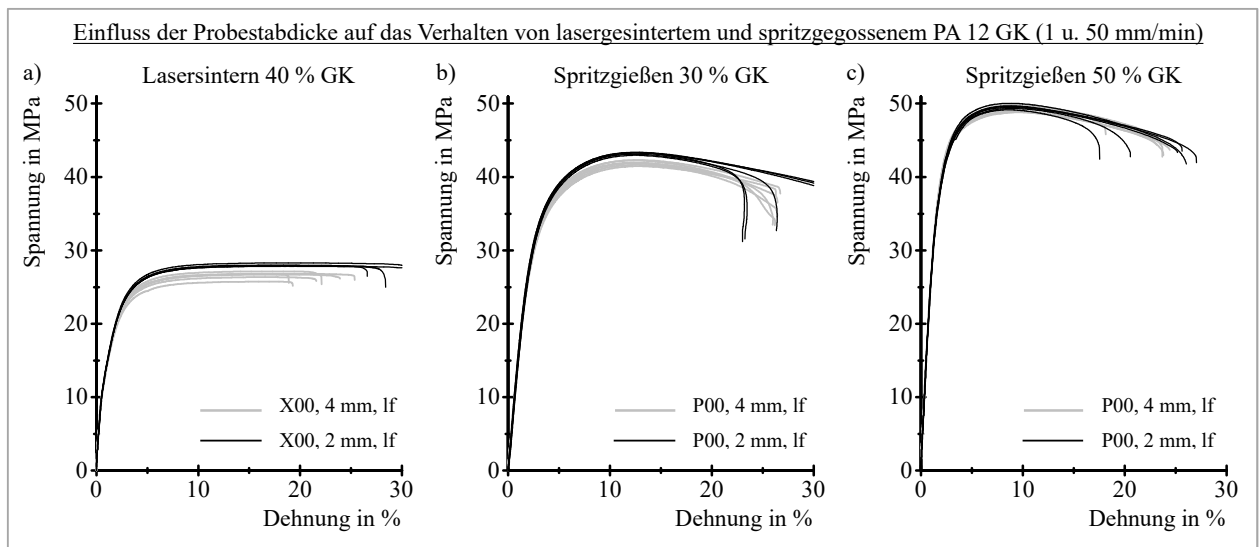


Abbildung 5.51: Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Spannungs-Dehnungs-Kurve von luftfeuchten Sinter- und Spritzgussproben aus unterschiedlich hoch gefülltem PA 12 GK

Zur Quantifizierung des Einflusses der Probekörperdicke wird eine Auswertung für unterschiedlich orientierte Probekörper, zwei Prüfgeschwindigkeiten und zwei Konditionierungszustände erstellt. Die Absolutkennwerte aller Versuchsreihen sind in Tabelle 10.26 bis Tabelle 10.37 im Anhang zusammengefasst. In den folgenden Unterabschnitten wird die prozentuale Veränderung von E-Modul, Zugfestigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit aufgrund der Verdoppelung der Probekörperdicke grafisch dargestellt und ausführlich diskutiert.

### 5.5.2 Einfluss der Dicke des Probestabs auf den Zug-E-Modul

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die prozentuale Änderung des E-Moduls von lasergesinterten Probestäben in X- und Y-Richtung bei gleichem Konditionierungszustand, gleichem Sintermaterial und unabhängig von der Prüfgeschwindigkeit auf etwa gleichem Niveau liegt (siehe Abbildung 5.52). In Z-Richtung ergeben sich abweichende Ergebnisse, was auf die schichtweise Herstellung der Probekörper zurückzuführen ist. Auffällig ist auch, dass die Ergebnisse der in Baurichtung orientierten Probestäbe stärker streuen. Der Grund hierfür ist die bereits erläuterte höhere Anfälligkeit für Sinterfehler in Baurichtung.

Im sinterfrischen Zustand liegt der Anstieg des E-Moduls der glaskugelgefüllten Proben durch die Verdopplung der Probekörperdicke in X- und Y-Richtung bei ca. 8 %. In Z-Richtung beträgt die prozentuale Veränderung ca. 14 % und ist damit im Vergleich zu den anderen Richtungen fast doppelt so hoch. Weiterhin ist zu sehen, dass der E-Modul des glaskugelgefüllten Sintermaterials stärker durch die Probendicke beeinflusst wird als der des ungefüllten Materials. Der E-Modul der 4 mm dicken, ungefüllten Z-Proben ist sogar geringer als der Modul der 2 mm dicken Proben, was jedoch auf die zuvor erwähnten Unregelmäßigkeiten im Sinterprozess zurückzuführen ist (siehe Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 in Unterabschnitt 5.1.3) und nicht auf den Einfluss der Probekörperdicke.

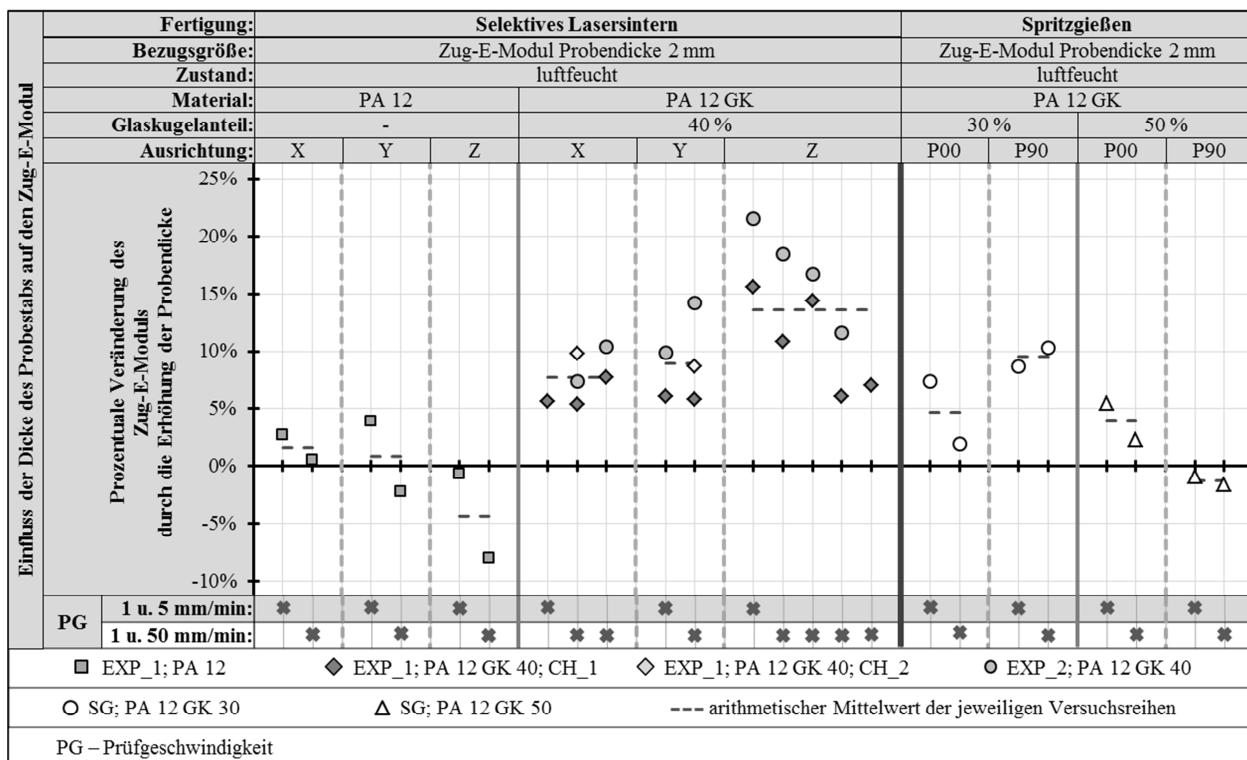


Abbildung 5.52: Einfluss der Dicke des Probestabs auf den Zug-E-Modul

Der höhere E-Modul der 4 mm dicken Sinterproben ist auf einen geringfügig höheren Kristallisationsgrad zurückzuführen. Der Grund für den höheren Kristallisationsgrad der 4 mm dicken Probestäbe ist die im Vergleich zu den 2 mm dicken Proben niedrigere Abkühlgeschwindigkeit im Inneren der Probestäbe. Die DSC-Messkurven des ersten Aufheizvorgangs von 2 und 4 mm dicken Sinterproben in Abbildung 5.53 zeigen, dass die Schmelzenthalpie der 4 mm dicken Y00-Probestäbe etwas größer ist.

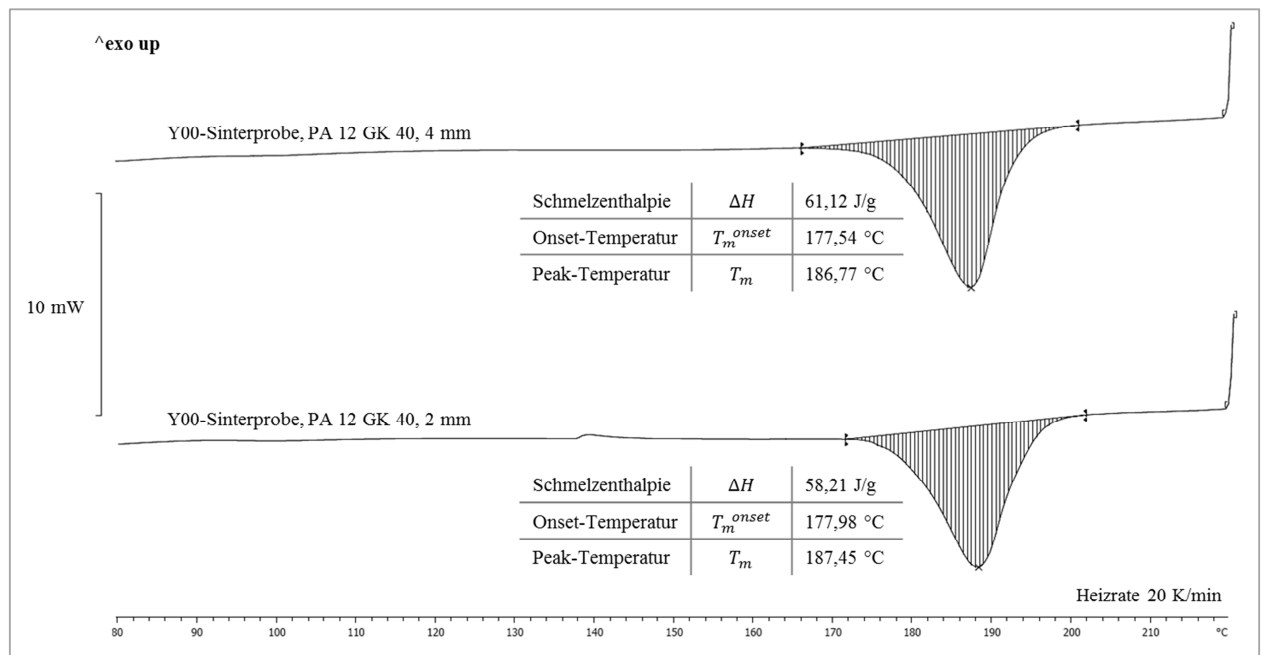


Abbildung 5.53: DSC-Messkurven des ersten Aufheizvorgangs von lasergesinterten Y-Proben aus PA 12 GK 40

Die höhere Schmelzenthalpie ist direkt proportional zum vorhandenen Kristallisationsgrad. Aus dem Verhältnis zwischen gemessener Schmelzenthalpie ( $\Delta_H$ ) und der Schmelzenthalpie einer 100-prozentig kristallinen Probe ( $\Delta_{H\_100\%}$ ) kann die Kristallinität der untersuchten Probe gemäß Gleichung (5.1) bestimmt werden [136]. Die DSC-Messung wird mit einer Heizrate von 20 K/min durchgeführt. Bei dieser Heizrate tritt keine wesentliche Änderung der Kristallinität auf [58].

$$\alpha = \frac{\Delta_H}{\Delta_{H\_100\%}} \quad (5.1)$$

mit:

- $\alpha$  = Kristallinität
- $\Delta_H$  = gemessene Schmelzenthalpie
- $\Delta_{H\_100\%}$  = Schmelzenthalpie einer 100-prozentig kristallinen Probe

Der E-Modul der Spritzgießproben mit 30 % Glaskugelananteil wird weniger stark durch die Erhöhung der Probendicke beeinflusst als der Modul der Sinterproben (siehe Abbildung 5.52). Bei den Stäben mit 50 % Glaskugelananteil ist die Beeinflussung noch geringer und liegt im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Der E-Modul der 4 mm dicken P90-Stäbe ist sogar etwas kleiner als der Modul der 2 mm dicken Zugproben. Der Anstieg des E-Moduls bei den P00-Proben und der Rückgang bei den P90-Proben aus PA 12 GK 50 können nicht allein durch die Kristallinität erklärt werden, da sowohl die Schmelzenthalpie der 4 mm dicken P00-Zugproben (siehe Abbildung 5.54) als auch die der 4 mm dicken P90-Proben (siehe Abbildung 5.55) größer ist, als die der jeweiligen 2 mm Proben. Gemäß Gleichung (5.1) bedeutet dies, dass die dickeren Spritzgussproben die höhere Kristallinität aufweisen. Durch die höhere Kristallinität der dickeren Probestäbe aus PA 12 GK 50 kann der höhere E-Modul der dickeren P00-Proben erklärt werden. Der Rückgang des E-Moduls bei den P90-Stäben ist allerdings auf überlagerte Effekte, wie beispielsweise eine stärkere Orientierung der Molekülketten bei den 2 mm dicken Probestäben, zurückzuführen. Dieses Ergebnis zeigt noch einmal, dass der Einfluss der Probekörperdicke auf die mechanischen Eigenschaften von Spritzgießteilen, wie in Unterabschnitt 5.5.1 erläutert, nicht immer eindeutig auf einen einzelnen Effekt zurückzuführen ist.

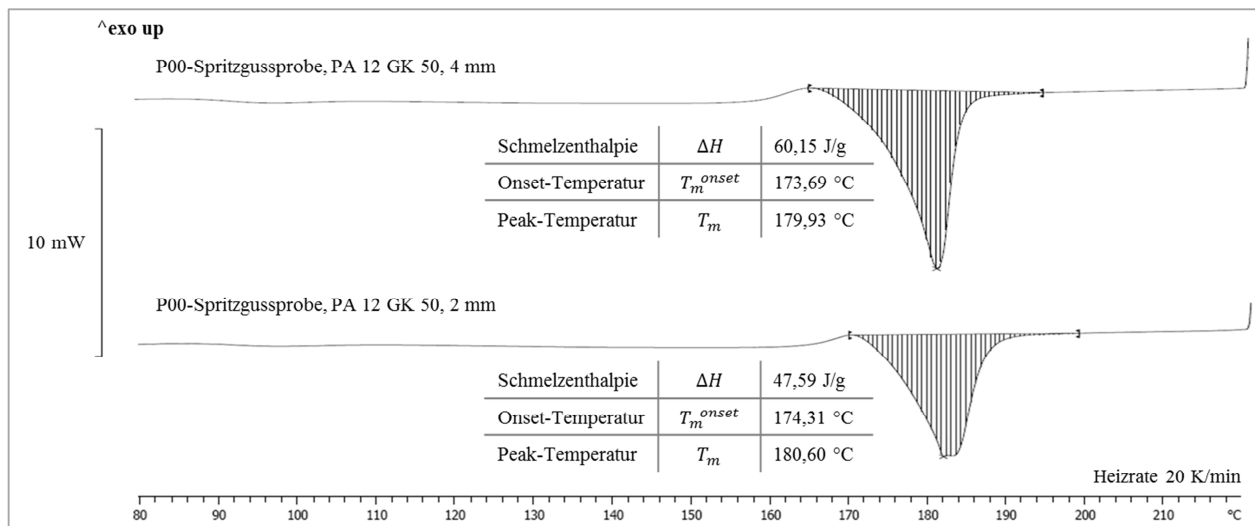


Abbildung 5.54: DSC-Messkurven des ersten Aufheizvorgangs von spritzgegossenen P00-Proben aus PA 12 GK 50

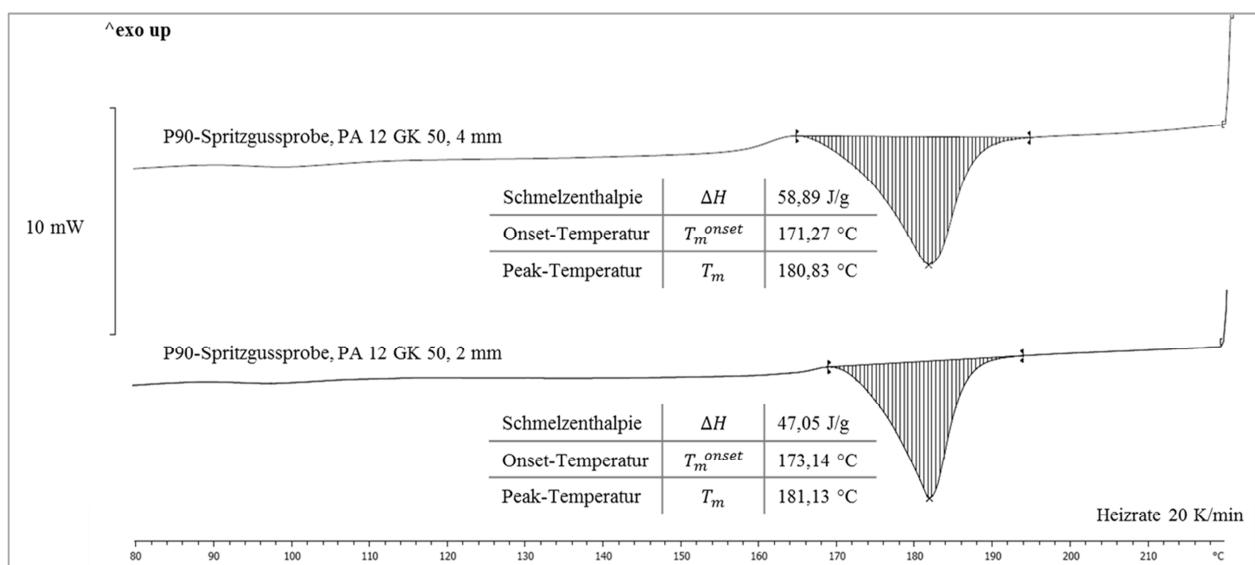


Abbildung 5.55: DSC-Messkurven des ersten Aufheizvorgangs von spritzgegossenen P90-Proben aus PA 12 GK 50

### 5.5.3 Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit der 4 mm dicken Sinterproben ist in fast allen Versuchsreihen größer als die der 2 mm dicken Proben (siehe Abbildung 5.56). Die prozentuale Änderung der Zugfestigkeit durch die Verdoppelung der Dicke der Probestäbe liegt in X- und Y-Richtung bei gleichem Konditionierungszustand und unabhängig von der Prüfgeschwindigkeit auf etwa gleichem Niveau. In Z-Richtung weicht die prozentuale Veränderung der Zugfestigkeit, wie zuvor beim E-Modul, im Mittel wieder etwas von den Ergebnissen in X- und Y-Richtung ab. Auch die Streuung der Versuchsreihen mit den in Baurichtung orientierten Probestäben ist wesentlich größer. Die Zugfestigkeit der ungefüllten Stäbe steigt durch die Erhöhung der Probekörperdicke weniger stark als die Festigkeit der glaskugelgefüllten Sinterproben. In Z-Richtung kommt es sogar zu einer Festigkeitsabnahme. Auch die Zugfestigkeit der 4 mm dicken Spritzgussproben liegt durchgängig oberhalb der Festigkeit der dünneren Proben. Der prozentuale Einfluss der Verdoppelung der Probendicke auf die Zugfestigkeit der spritzgegossenen Probestäbe liegt in allen Versuchsreihen im niedrigen einstelligen Prozentbereich und ist damit noch geringer als die prozentuale Veränderung der Zugfestigkeit der glaskugelgefüllten Sinterproben.

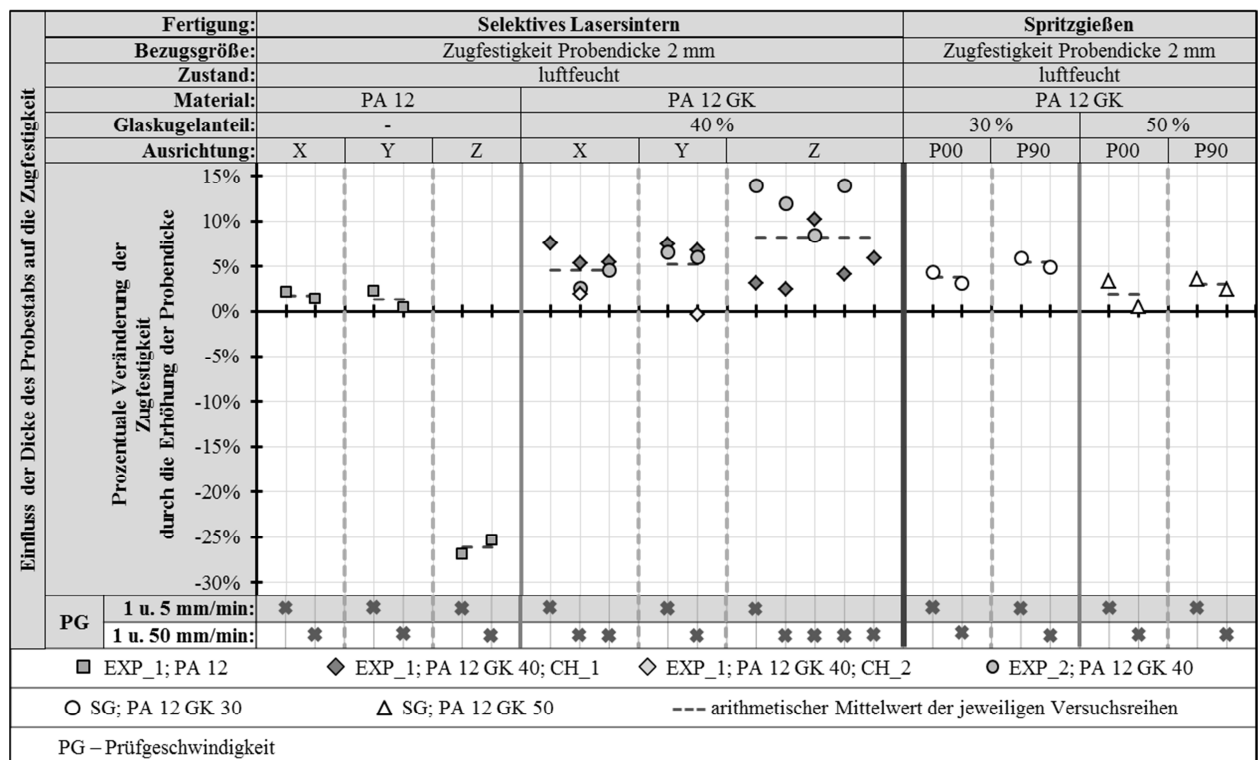


Abbildung 5.56: Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Zugfestigkeit

#### 5.5.4 Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Dehnung bei Zugfestigkeit

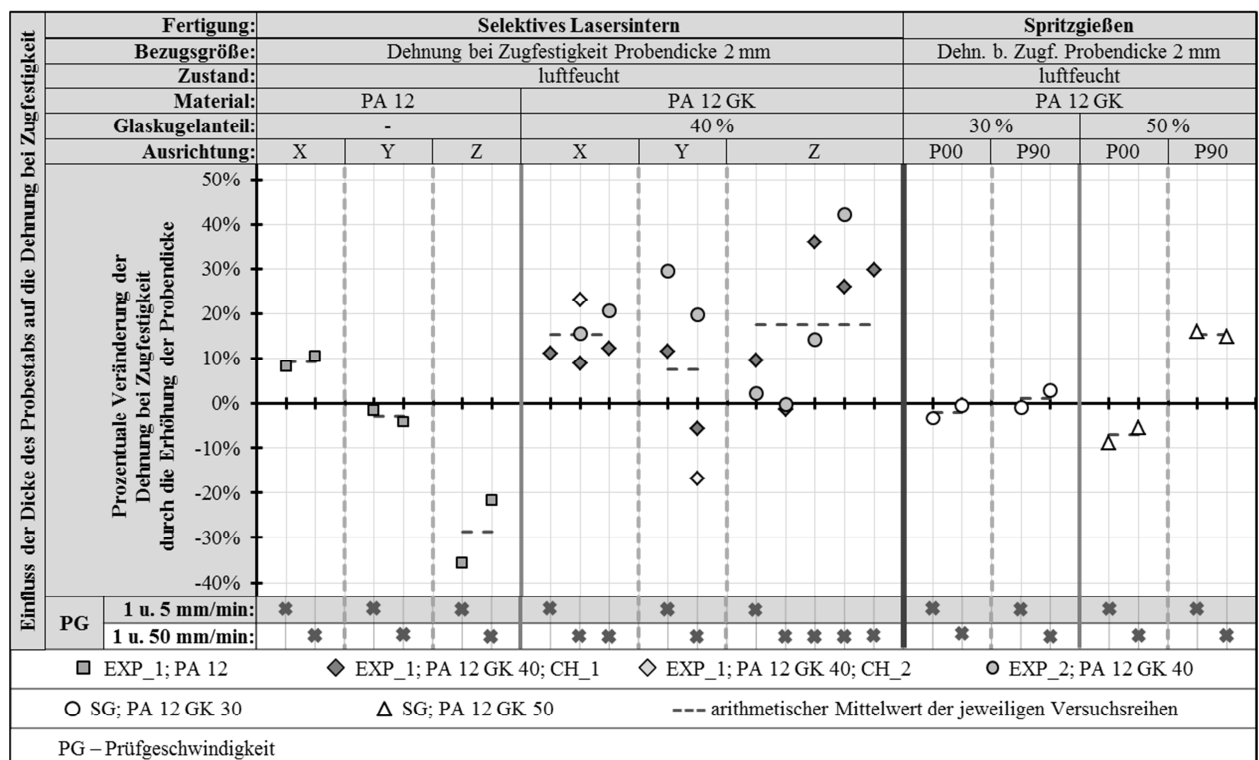


Abbildung 5.57: Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Dehnung bei Zugfestigkeit

Die Dehnung bei Zugfestigkeit von lasergesintertem und spritzgegossenem PA12 wird, wie der Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit, durch die Probekörperdicke beeinflusst (siehe Abbildung 5.57). Bei den glaskugelgefüllten Sinterproben bewirkt die Verdoppelung der Probestabdicke in allen Raumrichtungen



mehrheitlich einen Anstieg dieses Kennwerts. Die Untersuchungsergebnisse der luftfeuchten Proben aus ungefülltem PA 12 zeigen ein etwas anderes Verhalten als die der gefüllten Stäbe. Sie erreichten lediglich in X-Richtung eine Steigerung und in Y- sowie in Z-Richtung eine Verringerung der Dehnung bei Zugfestigkeit. Der Rückgang in Baurichtung ist aufgrund der bereits erwähnten Sinterfehler wenig aussagekräftig. Im direkten Vergleich ist die prozentuale Veränderung der Dehnung bei Zugfestigkeit der spritzgegossenen Probestäbe wesentlich geringer als die der Lasergesinterten.

### 5.5.5 Bewertung der Untersuchung des Einflusses der Dicke des Probestabs

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass sowohl die mechanischen Eigenschaften der beiden Sintermaterialien als auch die der Spritzgusswerkstoffe eine Abhängigkeit von der Probekörperdicke aufweisen. Die 4 mm dicken Proben aus PA 12 GK erreichen in fast allen Versuchsreihen eine höhere Steifigkeit und Festigkeit sowie eine größere Dehnung bei Zugfestigkeit als die 2 mm Probekörper. Dies gilt sowohl für die Sinter- als auch für die Spritzgussproben (siehe Tabelle 5.13).

Tabelle 5.13: Prozentuale Veränderung von Zugelastizitätsmodul, Zugfestigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit durch die Verdoppelung der Dicke des Probestabs bei lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK

Fertigungs- verfahren	Glaskugel- anteil	Zusammenfassung Einfluss Dicke des Probestabs PA 12 GK							
		Ausrichtung		Zug-E-Modul		Zugfestigkeit		Dehnung bei Zugfestigkeit	
				sf	lf	sf	lf	sf	lf
SLS	40%	X	EXP_1	+2,3 %	+7,1 %	+8,0 %	+5,0 %	+11,4 %	+13,9 %
SLS	40%	X	EXP_2	+2,9 %	+8,9 %	+6,9 %	+3,6 %	+10,6 %	+18,0 %
SLS	40%	Y	EXP_1	+2,5 %	+6,9 %	+8,9 %	+4,6 %	+16,3 %	+8,1 %
SLS	40%	Y	EXP_2	+6,4 %	+12,0 %	+7,9 %	+6,3 %	+14,4 %	+7,0 %
SLS	40%	Z	EXP_1	+6,0 %	+12,7 %	+8,4 %	+5,2 %	+12,9 %	+20,0 %
SLS	40%	Z	EXP_2	+23,9 %	+17,0 %	+53,0 %	+12,0 %	+37,0 %	+14,7 %
SG	30%	P00		-	+4,6 %	-	+3,8 %	-	-1,8 %
SG	30%	P90		-	+9,5 %	-	+5,4 %	-	+1,1 %
SG	50%	P00		-	+3,9 %	-	+2,0 %	-	-7,1 %
SG	50%	P90		-	-1,3 %	-	+3,1 %	-	+15,1 %
SLS	Selektives Lasersintern								
SG	Spritzguss								
sf	sinter- bzw- spritzfrisch								
lf	luftfeucht								

Der Anstieg von Steifigkeit, Festigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit durch die Verdoppelung der Probekörperdicke ist vorrangig auf einen höheren Kristallisationsgrad zurückzuführen (siehe Abbildung 5.53 bis Abbildung 5.55). Dieser ergibt sich durch die geringere Abkühlgeschwindigkeit der dickeren Probekörper. Ein weiterer Grund für den Anstieg der mechanischen Kennwerte ist, dass Fehlstellen gleicher Größe bei dickeren Proben weniger Einfluss haben als bei dünnen. Dies gilt insbesondere für Poren und nicht aufgeschmolzene Partikel beim Sintermaterial. Bei spritzgegossenen Probestäben haben auch das Verhältnis von Rand- zu Kernbereich und die strömungsinduzierte Orientierung von Molekülketten (siehe Unterabschnitt 5.2.2) Einfluss auf die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Dicke des Probekörpers. Aus diesem Grund ist der hier diskutierte quantitative Einfluss der Probekörperdicke auf

die Eigenschaften von spritzgegossenen Probestäben aus PA 12 GK 30 und PA 12 GK 50 nicht auf andere Kunststoffe übertragbar. Dies zeigen auch die zu Beginn dieses Abschnitts dargestellten Ergebnisse von Vordermann [114]. In Tabelle 5.14 sind zusätzlich die Ergebnisse zur Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften durch die Verdoppelung der Dicke des Probestabs von ungefülltem Sinterpolyamid zusammengefasst.

Tabelle 5.14: Prozentuale Veränderung von Zugelastizitätsmodul, Zugfestigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit durch die Verdoppelung der Dicke des Probestabs bei lasergesintertem PA 12

Fertigungs- verfahren	Glaskugel- anteil	Zusammenfassung Einfluss Dicke des Probestabs PA 12				
		Ausrichtung		Zug-E-Modul	Zugfestigkeit	Dehnung bei Zugfestigkeit
				If	If	If
SLS	-	X	EXP_1	+1,6 %	+1,8 %	+9,4 %
SLS	-	Y	EXP_1	+0,8 %	+1,3 %	-2,7 %
SLS	-	Z	EXP_1	-4,4 %	-26,2 %	-28,7 %
SLS	Selektives Lasersintern					
If	luftfeucht					

Die durchgeführten Versuchsreihen bestätigen die zu Beginn dieses Abschnitts dargestellten Ergebnisse der Untersuchungen von Haberstroh [135] für spritzgegossenes PA und von Breuninger [22] für lasergesintertes PA 12. Darüber hinaus wird deutlich, dass der Einfluss der Probekörperdicke im weiteren Verlauf der Arbeit weder beim direkten Vergleich von Materialkennwerten noch bei der Erstellung von Materialmodellen vernachlässigt werden darf. Eine Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs ist nur für Probekörper und Bauteile mit gleicher Wanddicke und vergleichbarer Temperaturhistorie sinnvoll. Aufgrund der Untersuchungsergebnisse ist auch davon auszugehen, dass die Ergebnisqualität von Struktursimulationen steigt, wenn das zugrunde liegende Materialmodell mithilfe von Werkstoffkennwerten erstellt wird, die mit Probestäben ermittelt werden, deren Dicke der Wandstärke des eigentlichen Formteils entspricht. In der Berechnungspraxis ist dies jedoch schwierig, da die bereitgestellten Materialkennwerte von Kunststoffwerkstoffen in der Regel mit 4 mm dicken Probekörpern ermittelt werden und viele Spritzgießteile Wanddicken im Bereich von 1 bis 2,5 mm aufweisen [114].

## 5.6 Charakterisierung des Einflusses der Charge und des Sinterexperten

Die Probestäbe zur Charakterisierung des Materialverhaltens der Sinterwerkstoffe wurden von zwei unterschiedlichen Sinterexperten hergestellt, um die Reproduzierbarkeit der diskutierten Eigenschaftsänderungen abschätzen zu können. Zur Quantifizierung des Einflusses der Charge bzw. des Sinterexperten auf die mechanischen Eigenschaften wird in diesem Unterabschnitt die prozentuale Veränderung von E-Modul, Zugfestigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit ausführlich diskutiert.

### 5.6.1 Einfluss der Charge/des Sinterexperten auf den Zug-E-Modul

Das Diagramm in Abbildung 5.58 zeigt, dass sowohl die Zug-E-Moduln der Probestäbe aus CH\_2 von EXP\_1 als auch die Stäbe von EXP\_2 bis auf eine Ausnahme kleiner sind als die jeweiligen Moduln der Stäbe aus CH\_1 von EXP\_1. In X-Richtung liegt die Veränderung im einstelligen Prozentbereich und in Y-Richtung im niedrigen zweistelligen Bereich. Auffällig ist der starke Rückgang in Z-Richtung bei den 2 mm dicken Proben, der zum einen darauf zurückzuführen ist, dass die Wahrscheinlichkeit von Sinter-



Abbildung 5.59 zeigt die prozentuale Veränderung der Zugfestigkeit. Der arithmetische Mittelwert der Festigkeit der Probestäbe aus CH\_2 von EXP\_1 und CH\_1 von EXP\_2 liegt in jeder Raumrichtung unter dem entsprechenden Wert der Bezugsgröße. Die größte prozentuale Veränderung besteht, wie bereits beim E-Modul, in Z-Richtung. Die Veränderung der Zugfestigkeit der Spritzgussproben aus zwei unterschiedlichen Chargen liegt im unteren einstelligen Prozentbereich. Tendenziell ist die Festigkeit der Stäbe aus CH\_2 geringfügig kleiner als die der ersten Charge.

### 5.6.3 Einfluss der Charge/des Sinterexperten auf die Dehnung bei Zugfestigkeit

Die Auswertung des Einflusses der Charge/des Sinterexperten auf die Dehnung bei Zugfestigkeit zeigt, dass dieser Kennwert besonders stark auf veränderte Randbedingungen reagiert (siehe Abbildung 5.60). Der Grund für die großen Abweichungen in Z-Richtung sind Poren und nicht aufgeschmolzene Pulverpartikel, die sich vorrangig an den Grenzflächen zwischen zwei Schichten anlagern (siehe Abschnitt 2.6). Weitere Gründe für die Schwankung der mechanischen Eigenschaften von Charge zu Charge sind z. B. der Pulverzustand (thermische Alterung siehe Unterabschnitt 3.5.4) und die Abkühlzeit zwischen der Belichtung von zwei Schichten (abhängig von der Gesamtquerschnittsfläche je Schicht). Die Dehnung bei Zugfestigkeit der spritzgegossenen Stäbe zeigt ebenfalls die größten chargenbedingten Veränderungen. Der prozentuale Einfluss ist im Vergleich zu Sinterproben allerdings sehr gering, er liegt im einstelligen Prozentbereich.

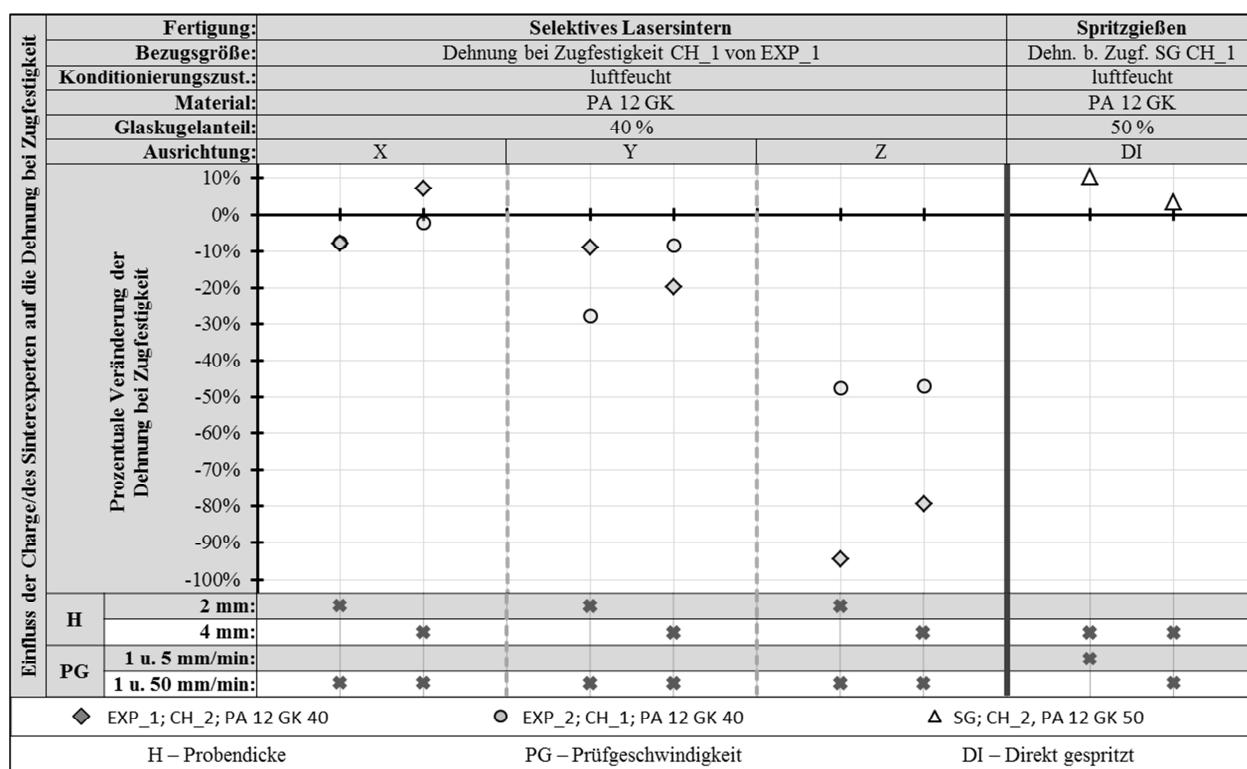


Abbildung 5.60: Einfluss der Charge/des Herstellers auf die Dehnung bei Zugfestigkeit

### 5.6.4 Bewertung der Untersuchung des Einflusses der Charge und des Sinterexperten

Das Diagramm a) der Abbildung 5.61 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Kurven der 4 mm dicken Y00-Sinterproben, die in drei Chargen und von zwei Sinterexperten gefertigt wurden. Diagramm b) stellt die Kurven von direkt gespritzten Probestäben aus zwei unterschiedlichen Chargen dar. In der Abbildung ist

zu sehen, dass die Spannungs-Dehnungs-Kurven der lasergesinterten Probestäbe wesentlich stärker streuen als die Kurven der spritzgegossenen Proben. Größere Unterschiede existieren beim Spritzgussmaterial nur bei der Bruchdehnung. Bis zur Streckgrenze verlaufen die Kurven nahezu identisch.

Bis zu einer Spannung von 15 MPa verlaufen die Kurven aller Sinterproben sehr ähnlich. An diesem Punkt liegen alle Kurven zwischen 1,05 und 1,55 % Dehnung. Bei weiter steigender Beanspruchung nimmt die Streuung allerdings erheblich zu. Bereits bei 20 MPa steigt die Streuung der Kurvenverläufe von 0,5 % auf 1,6 % Dehnung und hat sich somit mehr als verdreifacht. Die Streuung innerhalb einer Charge ist bei den gesinterten Probestäben ebenfalls um ein Vielfaches größer als die Streuung der spritzgegossenen Probestäbe. Die Standardabweichung der Zugfestigkeit liegt bei den Sinterproben zwischen 0,3 und 0,6 MPa, wohingegen die Zugfestigkeit der Spritzgussproben lediglich eine Standardabweichung von jeweils 0,1 % aufweist. Für die Zugfestigkeit aller 24 Zugversuche liegt die Standardabweichung sogar bei 2,2 MPa. Trotz der großen Streuung ist die Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve bei allen Sinterproben ähnlich.

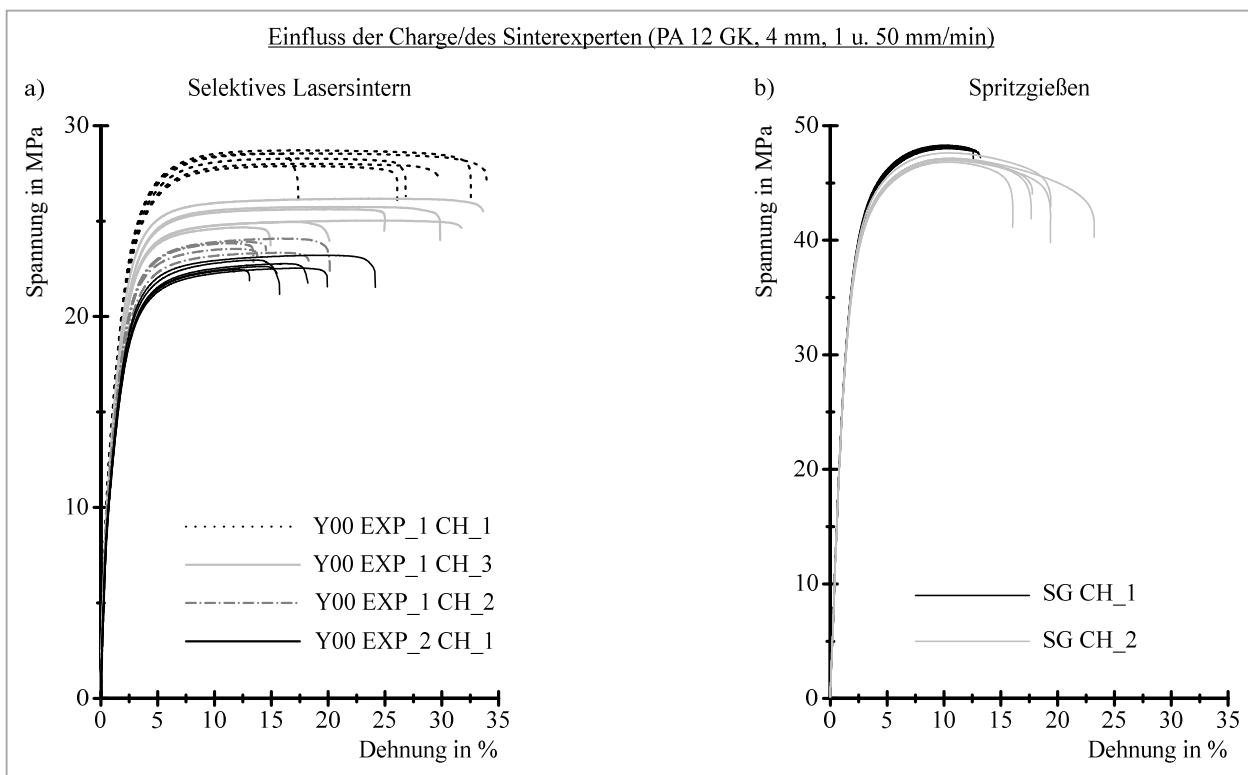


Abbildung 5.61: Einfluss der Charge/des Sinterexperten auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben

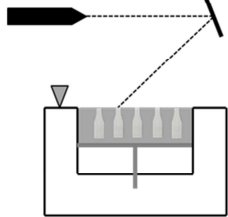
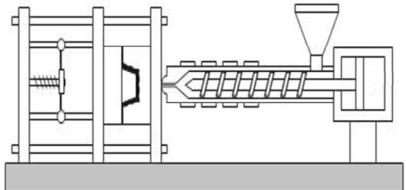
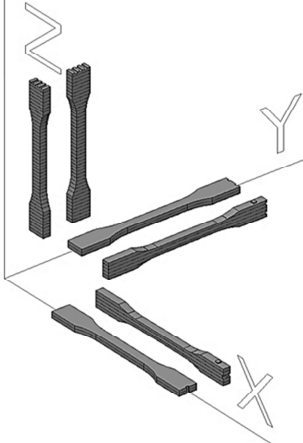
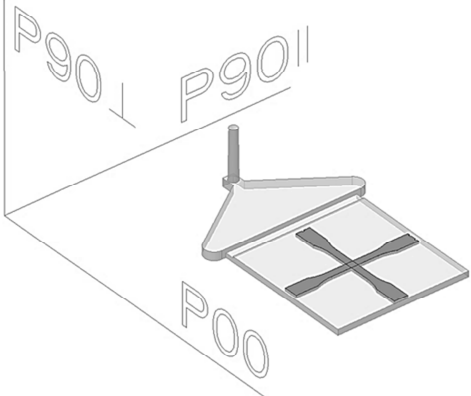
Die große Streuung der mechanischen Eigenschaften der Sinterproben verdeutlicht, dass die Reproduzierbarkeit der Materialeigenschaften trotz der Zusammenarbeit mit Sinterexperten, die langjährige Erfahrungen im Bereich Lasersintern besitzen, und der Verwendung von optimierten und vielfach erprobten Parametern als kritisch zu bewerten ist. Zum einen ist die Streuung innerhalb einer Charge von Sinterexperte zu Sinterexperte unterschiedlich groß, und zum anderen muss berücksichtigt werden, dass die mechanischen Werkstoffkennwerte auch ohne den Wechsel des Sinterexperten von Charge zu Charge in X- und Y-Richtung um 10 bis 20 % schwanken. In Z-Richtung sind die Abweichungen sogar noch größer. Aus den genannten Gründen müssen Versuchsergebnisse immer kritisch hinterfragt werden. Der Einfluss der Charge bzw. des Sinterexperten muss nachfolgend sowohl beim Einsatz von lasergesinterten Prototypen zur Verifikation von Simulationsergebnissen (siehe Kapitel 6) als auch bei der Analyse des quantita-

tiven Zusammenhangs (siehe Kapitel 7) berücksichtigt werden. Zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten Bauteilen sollten in Ergänzung zu dieser Arbeit weitere wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt werden. In enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Sinterexperten müssen Methoden und Prozesse entwickelt und implementiert werden, die die zuverlässige Reproduzierbarkeit der Bauteileigenschaften gewährleisten.

### 5.7 Bedeutung der Ergebnisse der systematischen Werkstoffcharakterisierung

Die Versuchsergebnisse der Werkstoffcharakterisierung zeigen, dass eine grundlegende Untersuchung des Materialverhaltens notwendig ist, wenn lasergesinterte Prototypen im Entwicklungsprozess von Spritzgießbauteilen aus PA 12 GK zur Verifizierung von Simulationsergebnissen und zur Abschätzung der quantitativen Belastbarkeit des späteren Spritzgießbauteils eingesetzt werden sollen. Die Untersuchung des Einflusses der Ausrichtung der Zugproben im Fertigungsprozess (siehe Unterabschnitt 5.2) belegt, dass die Materialeigenschaften von lasergesintertem PA 12 GK 40 aufgrund der geringeren Belastbarkeit in Baurichtung transversal-isotrop sind, wohingegen die mechanischen Eigenschaften der glaskugelgefüllten Spritzgussmaterialien keine Richtungsabhängigkeit aufweisen. Die Anisotropie von lasergesinterten Bauteilen ist grundsätzlich von den Raumkoordinaten der Sinteranlage und somit von der Ausrichtung des Bauteils im Sinterprozess abhängig. Tabelle 5.15 zeigt die Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK im direkten Vergleich.

Tabelle 5.15: Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK; Quelle Prinzipskizze Spritzgießen [52]

Fertigungsverfahren:	Selektives Lasersintern	Spritzgießen
Verfahrensprinzip:		
Raumkoordinaten:		
Material:	PA 12 GK 40	PA 12 GK 30 / PA 12 GK 50
Materialverhalten:	transversal-isotrop	isotrop
Zug-E-Modul:	$E_{t_X} = E_{t_Y} \neq E_{t_Z}$	$E_{t_{P00}} = E_{t_{P90  }} = E_{t_{P90\perp}}$
Zugfestigkeit:	$\sigma_{M_X} = \sigma_{M_Y} \neq \sigma_{M_Z}$	$\sigma_{M_{P00}} = \sigma_{M_{P90  }} = \sigma_{M_{P90\perp}}$
Dehnung bei Zugf.:	$\varepsilon_{M_X} = \varepsilon_{M_Y} \neq \varepsilon_{M_Z}$	$\varepsilon_{M_{P00}} = \varepsilon_{M_{P90  }} = \varepsilon_{M_{P90\perp}}$

Die ausführliche Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der betrachteten Werkstoffe zeigt weiterhin, dass auch bei unveränderten Maschineneinstellungen Faktoren vorhanden sind, die erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK haben. In den vorangegangenen Abschnitten wurde der quantitative Einfluss der Faktoren Wasseraufnahme (siehe Abschnitt 5.3), Prüfgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 5.4) und Dicke des Probestabs (siehe Abschnitt 5.5) analysiert. Abbildung 5.62 verdeutlicht, dass der prozentuale Einfluss der zuvor genannten Faktoren für lasergesintertes und spritzgegossenes PA 12 zum Teil unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Insbesondere die prozentuale Veränderung der Kennwerte Zugfestigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit durch den Einfluss der Wasseraufnahme ist bei den lasergesinterten Probestäben viel größer als bei den spritzgegossenen Zugproben. Verglichen wurden die Eigenschaften von sinter- bzw. spritzfrischen und luftfeuchten Probestäben. Der Einfluss durch die Verzehnfachung der Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min auf 50 mm/min hingegen ist bei den betrachteten Werkstoffen vergleichbar ausgeprägt. Auch hinsichtlich des prozentualen Einflusses der Dicke des Probestabs ergibt die Untersuchung der verschiedenen Werkstoffe annähernd vergleichbare Ergebnisse. Anhand der diskutierten Ergebnisse der Materialcharakterisierung wird deutlich, dass Werkstoffprüfungen für eine direkte Vergleichbarkeit von Werkstoffkennwerten folgende Voraussetzungen erfüllen müssen:

- Gleiche Abmessungen der Prüfkörper
- Fertigung mit gleichen Anlagenparametern
- Gleicher Konditionierungszustand
- Gleiche Randbedingungen bei der Werkstoffprüfung

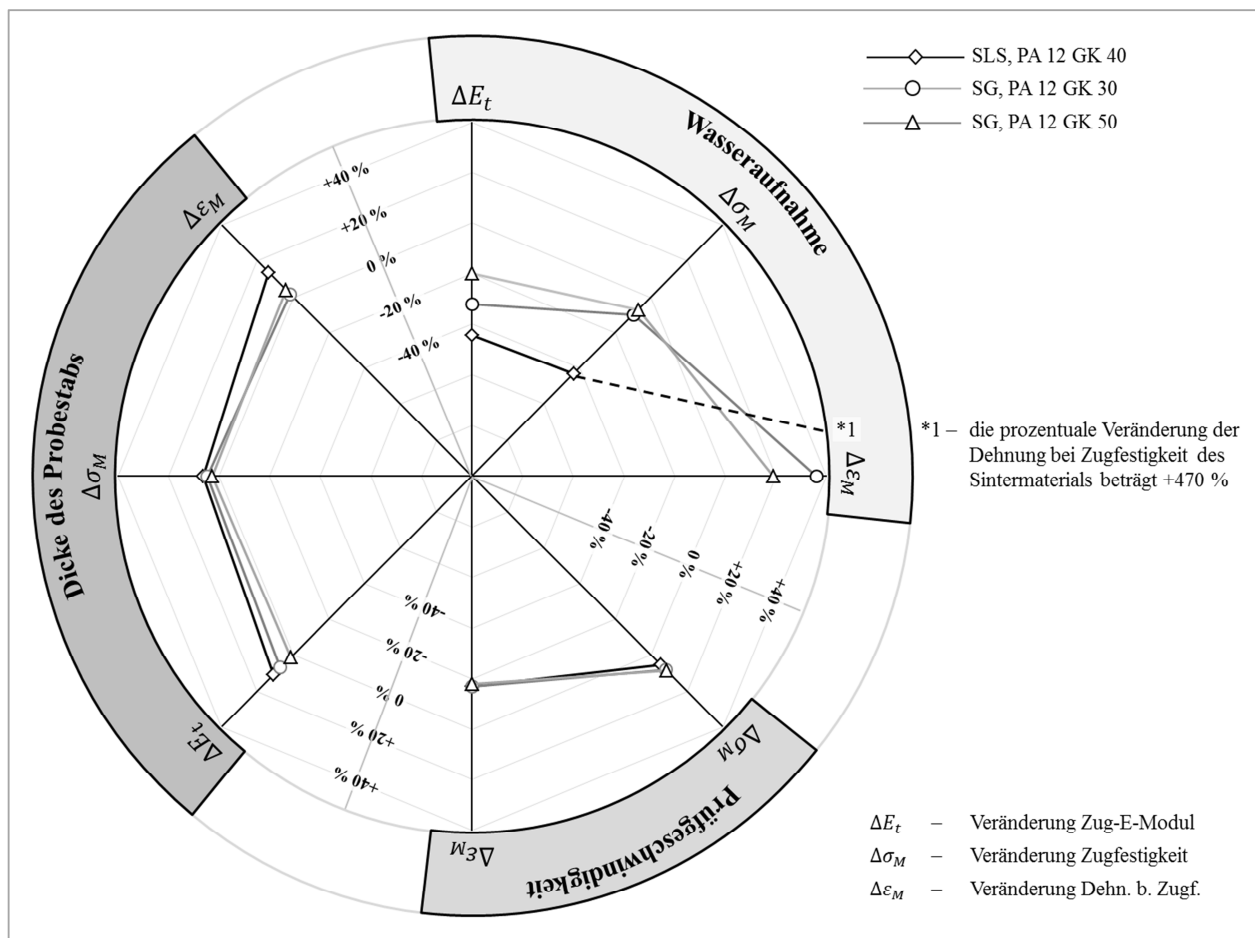


Abbildung 5.62: Prozentuale Veränderung der mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK durch die Einflussfaktoren Wasseraufnahme, Prüfgeschwindigkeit und Dicke des Probestabs

Auch wenn diese Voraussetzungen eingehalten werden, zeigt sich anhand der Versuchsergebnisse zur Ermittlung des Einflusses der Charge bzw. des Sinterexperten in Abschnitt 5.6, dass der E-Modul und die Zugfestigkeit von Sinterproben allein durch die Entnahme aus unterschiedlichen Chargen von einem Sinterexperten um bis zu 25 % schwanken können. Die Streuung der mechanischen Eigenschaften innerhalb einer Charge hingegen ist zumindest in X- und Y-Richtung gering. In Z-Richtung äußert sich der Einfluss von kleinen Fehlern im Sinterprozess deutlich stärker, sodass in Baurichtungen auch innerhalb einer Charge etwas größere Schwankungen auftreten können. Dieser Aspekt muss bei der Positionierung der Bauteile im Bauraum der Sinteranlage berücksichtigt werden, wenn Lasersinterbauteile zur Durchführung von Belastbarkeitsuntersuchungen oder als Kleinserienbauteil und nicht nur zur frühzeitigen Visualisierung von Bauteilkonzepten eingesetzt werden sollen. Folgerichtig muss das Bauteil für den Sinterprozess so ausgerichtet werden, dass die größten Beanspruchungen in X- und Y-Richtung und nicht in Baurichtung auftreten. Die hierfür notwendigen Informationen stehen den Maschinenbedienern jedoch in der Regel nicht zur Verfügung. Üblicherweise werden die Bauteile so positioniert, dass die Oberflächenqualität und die Bauteilgenauigkeit durch die Reduzierung des Treppenstufeneffekts verbessert werden oder dass möglichst viele Teile gleichzeitig in den Bauraum passen (siehe Unterabschnitt 3.3.1). Die Berücksichtigung von beanspruchungsspezifischen Aspekten und geometrischen Gesichtspunkten (Minimierung des Treppenstufeneffekts) bei der Ausrichtung der Bauteile für den Lasersinterprozess erfordert eine enge Abstimmung zwischen Konstruktion und Fertigung. In diesem Punkt ist eine Sensibilisierung aller Beteiligten notwendig, wenn lasergesinterte Prototypen sowohl zur Absicherung von Simulationsergebnissen als auch zur quantitativen Beurteilung des Bauteilverhaltens von Spritzgießbauteilen eingesetzt werden sollen. Auch die Fertigung von hoch beanspruchten Endprodukten durch Selektives Lasersintern erfordert die Berücksichtigung der zuvor genannten Aspekte. Ohne die notwendigen Informationen aus der Konstruktions- bzw. Simulationsabteilung kann der Maschinenbediener die beanspruchungsspezifischen Anforderungen nicht bei der Vorbereitung des Sinterprozesses berücksichtigen.



## 6 Simulation des Kurzzeitverhaltens von Lasersinterbauteilen

In aktuellen Entwicklungsprozessen wird die rechnergestützte Bauteilauslegung immer wichtiger. Insbesondere bei der beanspruchungsgerechten Bauteilgestaltung ist die mechanische Strukturanalyse von großer Bedeutung [114]. Mithilfe von Struktursimulationen können die mechanischen Eigenschaften und das Verhalten von Bauteilen und Baugruppen untersucht werden, bevor das reale Bauteil vorliegt. Eine Simulation beruht jedoch immer auf einer Vielzahl von Randbedingungen und Hypothesen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, Simulationsergebnisse durch Prototyp- oder Bauteilversuche frühzeitig abzusichern. Durch die Kombination von Simulation und Prototypversuch kann nachgewiesen werden, dass mithilfe der definierten Simulationsrandbedingungen und des gewählten Materialmodells das Bauteilverhalten beim vorliegenden Belastungszustand korrekt abgebildet wird. Bei der Entwicklung von Spritzgießteilen ist es jedoch nicht möglich, die durchgeführten Strukturanalysen frühzeitig durch Versuche an Serienteilen abzusichern, da das endgültige Spritzgießteil erst nach der zeit- und kostenintensiven Fertigung der Spritzgießwerkzeuge zur Verfügung steht. Deshalb wird nachfolgend analysiert, ob lasergesinterte Prototypen zur Verifizierung von Simulationsergebnissen eingesetzt werden können. Die Voraussetzung dafür ist die zuverlässige Abbildung der mechanischen Eigenschaften von lasergesinteren Bauteilen in der Strukturanalyse. In diesem Zusammenhang sind die Wahl und die Erstellung des Materialmodells von besonderer Bedeutung. Durch die Gegenüberstellung von Simulations- und Versuchsergebnissen wird in diesem Kapitel dargestellt, welche Art von Materialmodell benötigt wird, um das Kurzzeitverhalten von lasergesinteren Bauteilen korrekt zu simulieren. Darüber hinaus wird die auf diese Weise verifizierte Struktursimulation in Kapitel 7 zur Simulation des Kraft-Verformungs-Verhaltens des Spritzgießteils eingesetzt.

### 6.1 Grundlagen der Modellbildung

Kunststoffteile besitzen meist komplexe Geometrien. Für derartige Bauteile ist eine Festlegung des nachzuweisenden kritischen Bauteilquerschnitts nicht ohne Weiteres möglich, da im Inneren mehrachsige Spannungszustände vorliegen. Folglich kann das Nennspannungskonzept für die Dimensionierung nicht verwendet werden. Für solche Fälle wurden örtliche Spannungskonzepte entwickelt, mit denen sich unter Zuhilfenahme der Finite-Elemente-Methode (FEM) die lokalen Spannungen simulieren lassen [137]. Simulationen beruhen auf Modellen, mit denen versucht wird, ein möglichst gutes virtuelles Abbild der realen Bedingungen zu erstellen. Ein gutes Modell zur Erfassung der wesentlichen Einflüsse und Zusammenhänge sollte so einfach und unkompliziert wie möglich und nicht genauer bzw. komplexer als nötig sein. Ein Beispiel dafür ist, dass eine linear elastische Betrachtung von viskoelastischen Werkstoffen oftmals gute Ergebnisse liefert, wenn die Werkstoffkennwerte für die relevante Belastungsdauer und Beanspruchungshöhe zur Bestimmung des Sekantenmoduls verwendet werden. Durch die Verwendung von komplizierten Modellen kann nach außen hin leicht eine Genauigkeit suggeriert werden, die in Wirklichkeit gar nicht existent ist [115].

### 6.2 Charakterisierung und Auswahl von Materialmodellen für thermoplastische Kunststoffe

In Struktursimulationen wird das mechanische Werkstoffverhalten durch eine mathematische Formulierung, das Materialmodell, beschrieben. Es stellt den Zusammenhang zwischen Spannung, Dehnung, Zeit und Temperatur her [2]. Voraussetzung für eine präzise Abbildung der Eigenschaften von Kunststoffbau-

teilen durch Struktursimulationen ist die Verwendung des richtigen Materialmodells. Das Materialmodell hat gemeinsam mit der Modellierung der Geometrie und der Wahl der Randbedingungen entscheidenden Einfluss auf die Aussagekraft der Berechnungsergebnisse [1]. Bei der Simulation von Kunststoffbauteilen muss je nach Belastungszustand das passende Materialmodell ausgewählt werden. Nachfolgend wird zunächst auf die Wahl des Materialmodells eingegangen. Im Anschluss daran werden die wichtigsten Materialmodelle zur Abbildung des Materialverhaltens von Kunststoffen kurz erläutert.

### 6.2.1 Wahl des Materialmodells zur Simulation von Kunststoffbauteilen

Die Wahl des Materialmodells ist, wie bereits erwähnt, in erster Linie vom Belastungszustand (siehe Unterabschnitt 2.5.3) des Bauteils abhängig und immer ein Kompromiss zwischen der Genauigkeit, mit der das reale Werkstoffverhalten abgebildet wird, und dem Prüfaufwand zur Bestimmung der Parameter, die zur Definition des Modells benötigt werden. Darüber hinaus müssen die Randbedingungen der Simulationsaufgabe berücksichtigt und Vereinfachungen getroffen werden. Zulässige Vereinfachungen können zum Beispiel kleine Dehnungen, konstante Spannungen oder kurzzeitige Belastungen sein. Für die Berechnung von thermoplastischen Bauteilen kommt eine Vielzahl von Materialmodellen in Betracht. Zur Auswahl des für die jeweilige Berechnungsaufgabe passenden Modells kann die Belastungsdauer ( $t_{\text{Bel}}$ ) herangezogen werden (siehe Tabelle 6.1) [2].

Tabelle 6.1: Klassifizierung von Materialmodellen nach der Belastungsdauer gemäß [2]

Belastungsdauer ( $t_{\text{Bel}}$ )	Lastverlauf	Materialmodellierung
$t_{\text{Bel}} < 1$ Sekunde (crash)	stoßartig, monoton steigend (einmalig)	elastisch-plastisch viskoelastisch
$1 \text{ Sekunde} < t_{\text{Bel}} < 1 \text{ Stunde}$ (kurzzeitig)	monoton steigend (einmalig)	elastisch (Ursprungsmodul) elastisch-plastisch
$t_{\text{Bel}} > 1 \text{ Stunde}$ (langzeitig)	konstant oder langsam und monoton steigend (einmalig)	elastisch (fiktiver Kriechmodul) viskoelastisch viskoplastisch Kriechmodell
$n \times t_{\text{Bel}}$ (periodisch)	schwingend, zyklisch (mehrmalig)	viskoelastisch

### 6.2.2 Materialverhalten und Materialmodelle

Äußere Lasten bewirken innere Spannungen und führen zu einer Verformung des Bauteils. Abbildung 6.1 zeigt schematisch die Spannungs-Dehnungs-Kurve eines thermoplastischen Kunststoffs. Üblicherweise wird die Spannungs-Dehnungs-Kurve je nach Höhe der Werkstoffbeanspruchung in unterschiedliche Bereiche eingeteilt. Die ersten drei Bereiche werden in der Literatur als Gleichmaßdehnung und die Bereiche vier bis sechs als Einschnürdehnung bezeichnet [117]. Der Bereich der Einschnürdehnung existiert nur bei duktilen Werkstoffen. Spröde Werkstoffe versagen bereits am Ende des nicht linear viskoelastischen Bereichs (Punkt  $P_{B\_spröde}$  in Abbildung 6.1). Bei der Erstellung von Materialmodellen kann unterschiedliches Materialverhalten berücksichtigt werden.

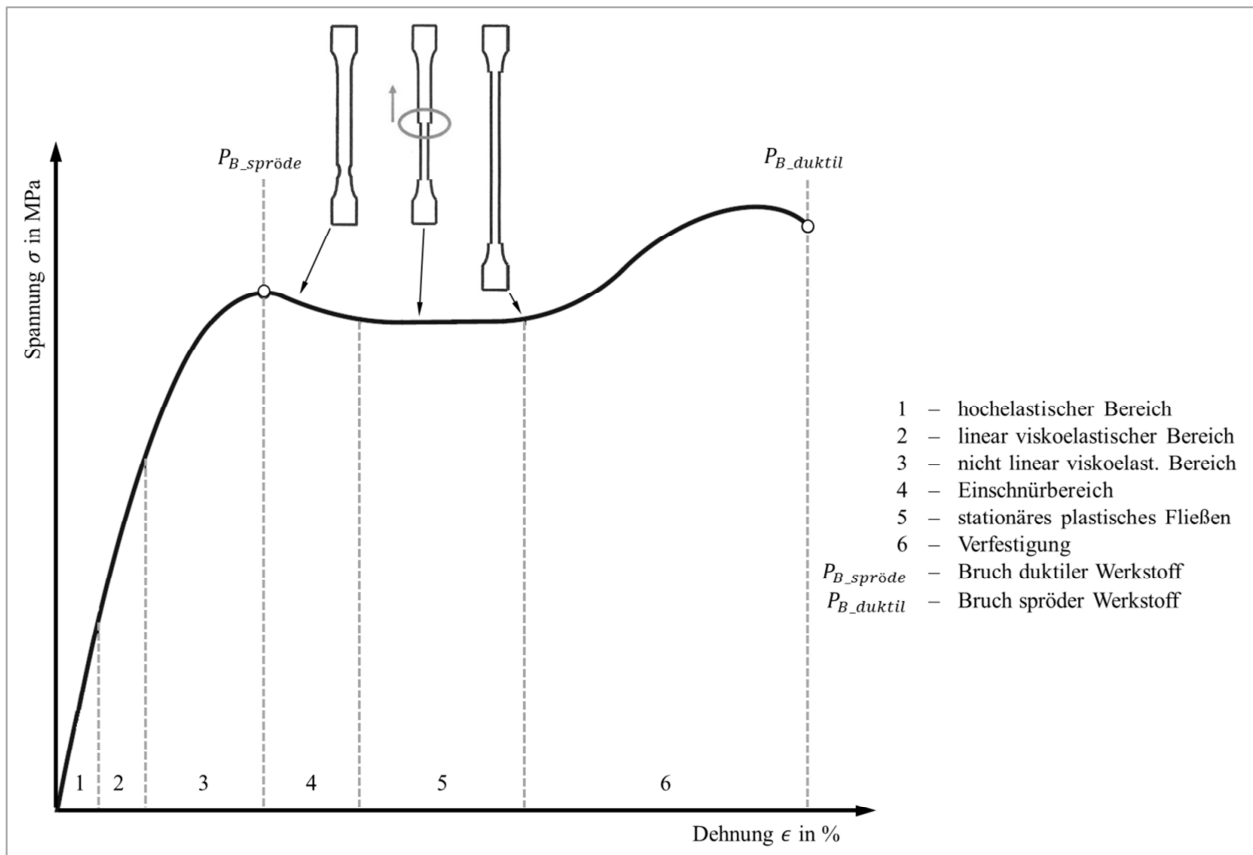


Abbildung 6.1: Charakteristische Beanspruchungsbereiche eines thermoplastischen Kunststoffs [2] [74]

### Elastisches Materialverhalten

Charakteristisch für rein elastisches Materialverhalten ist, dass jeder Belastung genau eine Deformation zugeordnet ist. Ob der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung linear oder nicht linear ist, geht allein aus der Bezeichnung elastisches Materialverhalten nicht hervor. Wie die Belastung erreicht und wie lange sie aufrechterhalten wird, ist für die Dehnungsantwort eines elastischen Materials irrelevant. Ein rein elastischer Körper reagiert unmittelbar auf eine äußere Last und speichert die eingeleitete Energie. Bei Entlastung setzt er die gespeicherte Energie wieder frei und verformt sich vollständig zurück. Be- und Entlastung haben den gleichen Kurvenverlauf [2] [138].

In der Praxis existieren nahezu keine ideal-elastischen Werkstoffe, dennoch wird das Verhalten vieler Materialien im Bereich kleiner Dehnungen und kurzzeitiger Belastung idealisiert durch einen solchen Ansatz beschrieben. Auch bei Kunststoffen kann bei einmaliger, kurzzeitiger Belastung und kleinen Dehnungen ein linear elastisches Materialmodell ausreichend sein, obwohl Polymerwerkstoffe ein ausgeprägtes, zeitabhängiges nicht linear viskoelastisches Verhalten (siehe Unterabschnitt 2.5.3), das ab einem bestimmten Lastniveau auch plastische Anteile aufweist, besitzen. Linear elastische Materialmodelle werden beispielsweise zur Durchführung von Struktursimulationen zur Geometrieoptimierung eingesetzt. Hier geht es lediglich um die Durchführung von vergleichenden Berechnungen an unterschiedlichen Varianten eines Bauteils, deren Ziel die Minimierung von geometrisch bedingten Spannungsspitzen ist. Aufgrund der Nichtberücksichtigung der Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von Polymerwerkstoffen von der Belastungsgeschwindigkeit sollte ein elastisches Materialmodell nach Möglichkeit mit einem E-Modul definiert werden, der bei einer Belastungsgeschwindigkeit ermittelt wurde, die der des späteren Bauteils entspricht. Dies ist bei realen Bauteilen in der Regel jedoch problematisch, da die Dehngeschwindigkeit je nach Bauteilbeanspruchung lokal unterschiedlich ist. Auch die Abhängigkeit der

mechanischen Eigenschaften von der Belastungsdauer sollte bei der Ermittlung des Ersatzmoduls berücksichtigt werden [1] [2].

### **Elastisch-plastisches Materialverhalten**

Es gibt eine Vielzahl von Werkstoffen, die sich unterhalb einer bestimmten Grenzspannung elastisch verformen und oberhalb plastisch. Die Grenzbeanspruchung wird als Fließspannung und das entsprechende Materialverhalten als elastisch-plastisch bezeichnet. Mithilfe von elastisch-plastischen Materialmodellen kann gemäß Gleichung (6.1) sowohl der elastische ( $\varepsilon_{el}$ ) als auch der plastische Dehnungsanteil ( $\varepsilon_{pl}$ ) von realen Werkstoffen abgebildet werden. In der Strukturmechanik ist Plastizität eine Materialnichtlinearität, die irreversible Verformungsanteile enthält. Plastisches Materialverhalten bedeutet demnach, dass nach Entlastung bleibende Verformungsanteile vorhanden sind. Diese Verformungsanteile sind irreversibel, da die zur Verformung benötigte Energie vollständig dissipiert wird. Die Größe der Gesamtverformung ( $\varepsilon_{ges}$ ) hängt bei elastisch-plastischem Materialverhalten nur von der Belastung und nicht wie bei viskosem Materialverhalten zusätzlich von der Belastungsdauer ab [1] [2] [138] [139].

$$\varepsilon_{ges} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} \quad (6.1)$$

Zur Beschreibung der Plastizität des Materials stehen in den verschiedenen FEM-Programmen unterschiedliche Materialgesetze zur Verfügung. Durch die Angabe einer Spannungs-Dehnungs-Kurve, eines Fließkriteriums und der Beschreibung des plastischen Bereichs wird während der Analyse die Steifigkeit jedes finiten Elements an die lokal vorhandene Werkstoffbeanspruchung angepasst [91]. Die Art der Beschreibung des plastischen Bereichs und damit die Genauigkeit der Abbildung des realen Materialverhaltens sind abhängig vom verwendeten Materialmodell. Grundsätzlich kann der plastische Bereich auf drei Arten (ideal plastisch, plastisch verfestigend, plastisch entfestigend) beschrieben werden. Bei ideal plastischem Verhalten ergibt sich oberhalb der Fließgrenze ein horizontaler Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve. Verfestigendes Materialverhalten im plastischen Bereich führt zu einem weiteren Ansteigen der Spannung. Bei entfestigendem Verhalten hingegen kommt es oberhalb der Fließgrenze zu einem Abfall der Spannung [138]. Bei technischen Kunststoffen ist in der Regel ein weiteres Ansteigen der wahren Spannung (siehe Unterabschnitt 6.2.3) im plastischen Bereich zu beobachten. Aus diesem Grund sollten zur Beschreibung von Polymerwerkstoffen elastisch-plastische Materialmodelle mit Verfestigung verwendet werden. Derartige Materialmodelle berücksichtigen jedoch standardmäßig nicht das kunststofftypische Ansteigen der Fließgrenze mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit (siehe Unterabschnitt 2.5.3). Soll dieser Effekt Berücksichtigung finden, so muss das Materialmodell entsprechend erweitert werden [2].

### **Viskoses Materialverhalten**

Bei viskosem Materialverhalten ist die Größe der Verformung, die durch eine Belastung hervorgerufen wird, zum einen von der Höhe der Belastung und zum anderen von der Belastungsdauer abhängig. Die zur Belastung notwendige Energie wird bei viskoser Verformung, wie bei plastischer Verformung, vollständig in Wärme umgewandelt, sodass nach der Entlastung keine Rückverformung erfolgt. Existiert zwischen Spannung und Verformungsgeschwindigkeit ein linearer Zusammenhang, so wird das entsprechende Materialverhalten linear viskos genannt. Andernfalls liegt nicht linear viskoses Materialverhalten vor [2].

### **Viskoelastisches Materialverhalten**

In Unterabschnitt 2.5.3 wurde bereits darauf hingewiesen, dass Polymere viskoelastisches Materialverhalten aufweisen. Sie besitzen elastisches, plastisches und viskoses Materialverhalten. Allgemein wird ihr Materialverhalten als viskoelastisch beschrieben, da bei Kunststoffen das elastische und das viskose Materialverhalten sehr stark überlagert sind. Das viskoelastische Materialverhalten von Kunststoffen wird in der Regel durch die Kombination von Feder- und Dämpferelementen veranschaulicht (siehe 4-Elemente-Modell in Tabelle 2.6). Durch die Verwendung von viskoelastischen Materialmodellen hängt die Verformung eines Bauteils nicht mehr nur von der Spannung und der Temperatur ab. Das Verformungsverhalten ist dann zusätzlich zeitabhängig. In der Strukturmechanik ist Viskoelastizität eine Materialnichtlinearität, die allerdings keine irreversiblen (plastischen) Verformungsanteile enthält [2] [138].

Viskoelastische Materialmodelle können zur Beschreibung des Materialverhaltens von Kunststoffen bei langzeitiger Belastung eingesetzt werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass das Belastungsniveau so niedrig ist, dass es nicht zum Aufbau von signifikanten, irreversiblen Deformationen führt. Ist diese Voraussetzung erfüllt, so beschreibt ein viskoelastisches Materialmodell die mechanischen Eigenschaften eines Bauteils auch bei Entlastungsvorgängen und mehrmaliger Belastung. Das viskoelastische Materialverhalten von Kunststoffen wird in FEM-Programmen in der Regel mithilfe von Prony-Reihen, die den zeitabhängigen Kriech- oder Relaxationsmodul beschreiben, abgebildet. Als Datengrundlage zur Erstellung eines viskoelastischen Materialmodells werden Relaxations- oder Kriechmoduldaten benötigt. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf dem Einsatz von Kurzzeitversuchen zur Verifizierung von Simulationsergebnissen. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nicht weiter auf die Definition von viskoelastischen Materialmodellen eingegangen. Gleiches gilt für Kriechmodelle. Mit Kriechmodellen kann das Materialverhalten von Kunststoffen unter langzeitiger und konstanter Belastung beschrieben werden [2]. Das Vorgehen zur Modellierung von viskoelastischen Materialmodellen und Kriechmodellen wird beispielsweise in [1], [2] und [140] detailliert erläutert. Ist das Beanspruchungsniveau des Werkstoffs allerdings so hoch, dass es zum Aufbau von signifikanten, irreversiblen Deformationen führt, ist die Voraussetzung für die Anwendbarkeit eines viskoelastischen Materialmodells nicht mehr erfüllt. In diesem Fall wird ein viskoplastisches Materialmodell benötigt. Viskoplastische Materialmodelle sind in der Lage, das zeitabhängige Voranschreiten von plastischen Deformationen zu beschreiben. Die Höhe der plastischen Dehnung ist bei viskoplastischem Materialverhalten zusätzlich von der Dehnrate sowie der Beanspruchungshöhe abhängig. In der Strukturmechanik ist Viskoelastizität eine Materialnichtlinearität, die irreversible (plastische) Verformungsanteile enthält [138] [140].

### **Anisotropes Materialverhalten**

Ein wichtiger Aspekt, der bei der Materialmodellierung von lasergesinterten und spritzgegossenen Kunststoffbauteilen ebenfalls berücksichtigt werden muss, ist das in Abschnitt 5.2 ausführlich charakterisierte und diskutierte anisotrope Materialverhalten. Anisotrope Materialeigenschaften haben zur Folge, dass die Fließfläche (siehe Abschnitt 6.2.3) mithilfe eines isotropen Fließkriteriums wie dem allgemein bekannten von Mises-Kriterium (siehe Unterabschnitt 6.3.2) nicht mehr ausreichend genau beschrieben werden kann. Hill [141] hat ein Fließkriterium entwickelt, das plastisches Fließen in Verbindung mit orthotropem Materialverhalten berücksichtigt (siehe Unterabschnitt 6.3.3). Eine Anwendung dieses Kriteriums scheitert in der Praxis jedoch häufig an der Bestimmung der notwendigen Werkstoffkennwerte [2].

### 6.2.3 Wahre Spannungen und Dehnungen

Im Zugversuch wird in der Regel der Verlauf der technischen Spannung ( $\sigma_t$ ) (Nennspannung) über der technischen Dehnung ( $\varepsilon_t$ ) ermittelt. Zur Erstellung von Materialmodellen für FEM-Programme werden jedoch die wahre Spannung ( $\sigma_w$ ) und die wahre Dehnung ( $\varepsilon_w$ ) benötigt [91].

#### Wahre Spannung

Die im Zugversuch gemessene technische Spannung ( $\sigma_t$ ) entspricht aufgrund der auftretenden Querschnittsänderung nicht der im Material vorhandenen wahren Spannung ( $\sigma_w$ ), da die aktuell gemessene Zugkraft ( $F_i$ ) gemäß Gleichung (6.2) immer auf die Anfangsquerschnittsfläche  $A_0$  bezogen wird [63].

$$\sigma_t = \frac{F_i}{A_0} \quad (6.2)$$

Im Gegensatz zur technischen Spannung wird bei der Berechnung der wahren Spannung die gemessene Zugkraft gemäß Gleichung (6.3) immer auf die aktuell vorhandene Querschnittsfläche bezogen [74].

$$\sigma_w = \frac{F_i}{A_i} \quad (6.3)$$

Die wahre Spannung kann unter der Annahme eines inkompressiblen Materialverhaltens ( $\nu = 0,5$ ) mit hinreichender Genauigkeit aus der technischen Spannung berechnet werden. Bei dieser Umrechnung wird davon ausgegangen, dass plastische Verformung ohne Volumenänderung abläuft und dass die Volumenänderung durch elastische Dehnung vernachlässigbar ist [2] [63]. Die Querkontraktionszahl von Kunststoffen nähert sich mit zunehmender Belastungszeit und Belastungshöhe sowie steigender Temperatur ohnehin dem Wert 0,5 an (siehe Gleichung (4.1) in Unterabschnitt 4.5.2), was der Umrechnung gemäß der hier erläuterten Vorgehensweise entgegenkommt. Aus der für die nachträgliche Berechnung der wahren Spannung notwendigen Bedingung der Volumenkonstanz ergibt sich der in Gleichung (6.4) dargestellte Zusammenhang (siehe hierzu auch Abbildung 6.2).

$$V_0 = A_0 \cdot L_0 = A_i \cdot L_i = V_i = A_{i+1} \cdot L_{i+1} = V_{i+1} \quad (6.4)$$

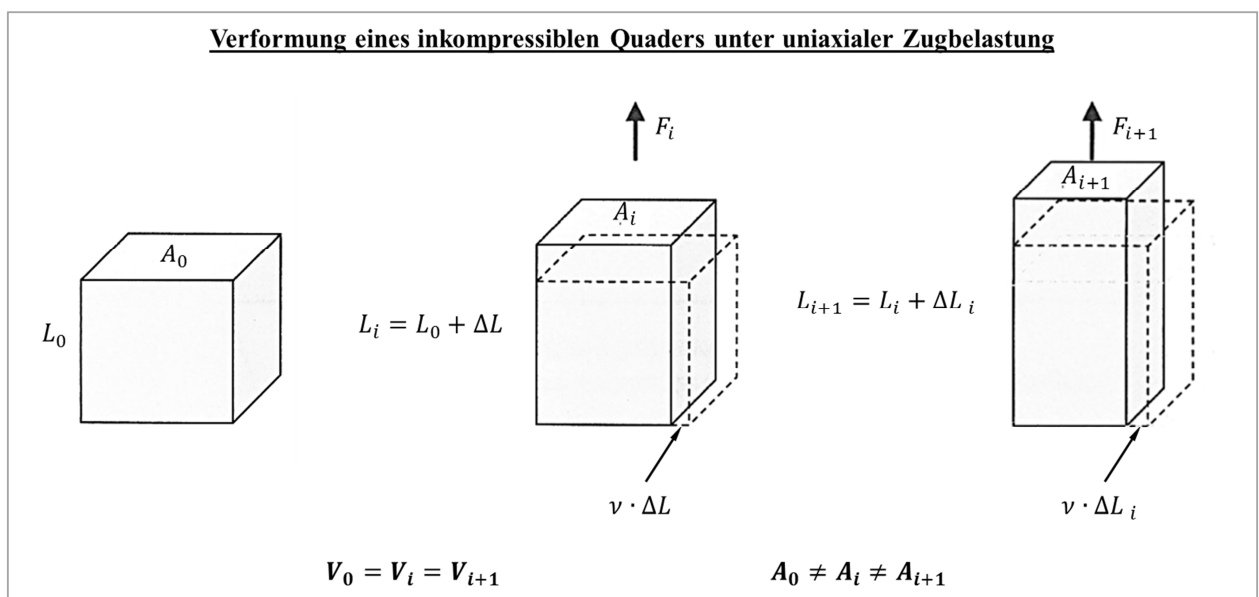


Abbildung 6.2: Verformung eines inkompressiblen Quaders unter uniaxialer Zugbelastung [74]

Durch das Einsetzen von Gleichung (6.4) in Gleichung (6.3) ergibt sich zur Berechnung der wahren Spannung der in Gleichung (6.5) dargestellte Zusammenhang [63] [74].

$$\sigma_w = \frac{F_i \cdot L_i}{A_0 \cdot L_0} = \frac{F_i \cdot (L_0 + \Delta L)}{A_0 \cdot L_0} = \sigma_t + \sigma_t \cdot \frac{\Delta L}{L_0} = \sigma_t \cdot (1 + \varepsilon_t) \quad (6.5)$$

### Wahre Dehnung

Zur Berechnung der wahren Dehnung wird, im Gegensatz zur technischen Dehnung, die jeweils vorhandene infinitesimale Längenänderung ( $dL$ ) auf die aktuelle Länge ( $L$ ) des Körpers und nicht auf die Ausgangslänge ( $L_0$ ) bezogen. Für die wahre Dehnungsänderung ( $d\varepsilon_w$ ) gilt zu jedem Zeitpunkt Gleichung (6.6) [63].

$$d\varepsilon_w = \frac{(L + dL) - L}{L} = \frac{dL}{L} \quad (6.6)$$

Die technischen und wahren Werte stimmen nur für kleine Dehnungen annähernd überein (siehe Abbildung 6.3). Die wahre Gesamtdehnung kann gemäß Gleichung (6.7) mithilfe der technischen Dehnung berechnet werden [63].

$$\varepsilon_w = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \ln(1 + \varepsilon_t) \quad (6.7)$$

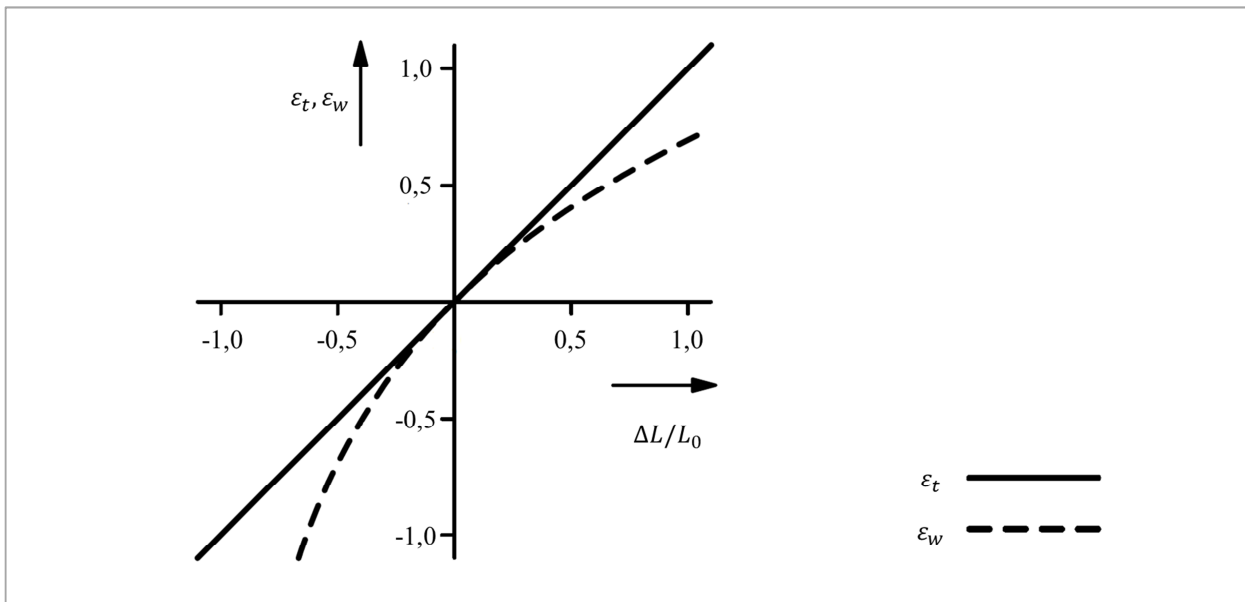


Abbildung 6.3: Vergleich der technischen Dehnung  $\varepsilon_t$  und der wahren Dehnung  $\varepsilon_w$  [63]

## 6.3 Äquipotenzialbedingungen

In realen Bauteilen liegen in der Regel mehraxiale Spannungszustände vor. Die Bewertung eines allgemeinen Spannungszustands im Hinblick auf die Detektion des Fließbeginns ist aufwendiger als die Bewertung eines einachsigen Spannungszustands. Im einachsigen Fall entstehen plastische Dehnungen, sobald die Fließspannung überschritten wird. Für den mehraxialen Spannungszustand werden Äquipotenzialbedingungen eingesetzt, um einen allgemeinen mehraxialen Spannungszustand auf einen äquivalenten uniaxialen Beanspruchungszustand zurückzuführen. Dieser äquivalente Zustand entspricht dem mehraxia-

len Zustand im Hinblick auf Werkstoffbeanspruchung und Werkstoffschädigung. Mithilfe eines funktionalen Zusammenhangs wird eine eindimensionale Vergleichsspannung berechnet, welche die äquivalente Werkstoffanstrengung darstellt, die ein Probekörper erfährt, wenn er uniaxial mit dieser Spannung belastet wird. Der auf diese Weise berechnete quasi uniaxiale Spannungszustand kann als Vergleichsgröße für experimentell ermittelte uniaxiale Spannungskennwerte verwendet werden [2].

Der zugrunde liegende Ansatz bei der Verwendung von Äquipotenzialbedingungen ist, dass alle mehraxialen Spannungszustände, die zum Beispiel zum Fließen des Materials oder zum Werkstoffversagen führen, im Hauptnormalspannungsraum auf einer gemeinsamen Fläche, der sogenannten Äquipotenzialfläche, liegen. Grundsätzlich kann jeder Spannungszustand in Form eines Punktes im Hauptnormalspannungsraum angegeben werden. Alle Spannungszustände, die innerhalb der Äquipotenzialfläche liegen (Punkt P' in Abbildung 6.4), führen nicht zu dem jeweils zu bewertenden Ereignis, Spannungszustände außerhalb der Fläche (Punkt P'' in Abbildung 6.4) jedoch schon. Die Lage und Form der Äquipotenzialfläche wird durch eine mathematische Gleichung beschrieben. Grundsätzlich können Äquipotenzialflächen sowohl für ultimative Versagensformen als auch für nicht ultimative Formen definiert werden. Nicht ultimative Versagensformen sind zum Beispiel das Erreichen bestimmter Deformationsgrade oder die Beobachtung irreversibler Werkstoffschädigungen. Grundsätzlich beschreiben Äquipotenzialflächen alle Zustände äquivalenter Werkstoffanstrengung [2]. Durch den Einsatz von Äquipotenzialflächen kann der Fließbeginn bei der Verwendung von elastisch-plastischen Materialmodellen beurteilt werden. Ist die Vergleichsspannung gleich der uniaxial ermittelten Fließspannung, beginnt das Material zu fließen. In diesem Zusammenhang werden Äquipotenzialbedingungen als Fließkriterium bezeichnet. Wird anhand von Äquipotenzialbedingungen das Bauteilversagen beurteilt, dann werden sie als Versagenskriterium bezeichnet.

### 6.3.1 Fließkriterien

Mithilfe von Fließkriterien wird überprüft, ob sich ein Material bei einem vorliegenden Spannungszustand noch elastisch verhält oder ob plastische Verformungsanteile vorhanden sind. Gleichung (6.8) gibt die allgemeine Form eines Fließkriteriums an [139].

$$f = f(\sigma_{ij}, \theta, H_i) \quad \begin{cases} < 0 & \text{elastischer Bereich} \\ \geq 0 & \text{plastischer Bereich} \end{cases} \quad (6.8)$$

mit:

- $\sigma_{ij}$  = Spannung in der jeweiligen Richtung
- $\theta$  = Temperatur
- $H_i$  = Verfestigungsparameter (Zusatzvariable)

Wie bereits erwähnt, können Fließkriterien in Form von Fließflächen im dreidimensionalen Hauptnormalspannungsraum visualisiert werden. Die Form der Fläche gibt den Kriterien oftmals ihren Namen. Eines der bekanntesten Fließkriterien ist das Zylinder- bzw. von Mises-Fließkriterium [2]. In Abschnitt 6.6 wird sowohl die Eignung des isotropen von Mises-Kriteriums als auch die des anisotropen Hill-Kriteriums zur Simulation des Kurzzeitverhaltens von lasergesinterten Kunststoffbauteilen diskutiert. Aus diesem Grund werden diese beiden Kriterien nachfolgend ausführlich betrachtet. Es gibt noch eine Vielzahl weiterer Kriterien, auf die an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen wird, da sie im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet werden.



### 6.3.2 Von Mises-Fließkriterium

Das von Mises-Fließkriterium beschreibt plastisches Fließen in Verbindung mit isotropem Materialverhalten. Die Äquipotenzialfläche dieses Kriteriums ist ein Zylinder im Hauptnormalspannungsraum (siehe Abbildung 6.4 links) und eine Ellipse in der  $\sigma_1$ - $\sigma_2$ -Ebene (siehe Abbildung 6.4 rechts) [2]. Gleichung (6.9) gibt die mathematische Form des von Mises-Fließkriteriums an [139].

$$f(\sigma_{ij}, \sigma_y) = q_{vM} - \sigma_y = 0 \quad (6.9)$$

mit:

- $q_{vM}$  = von Mises-Vergleichsspannung nach Gleichung (6.10) bzw. (6.11)
- $\sigma_{ij}$  = Spannung in der jeweiligen Richtung
- $\sigma_y$  = Fließspannung des uniaxial belasteten Probekörpers

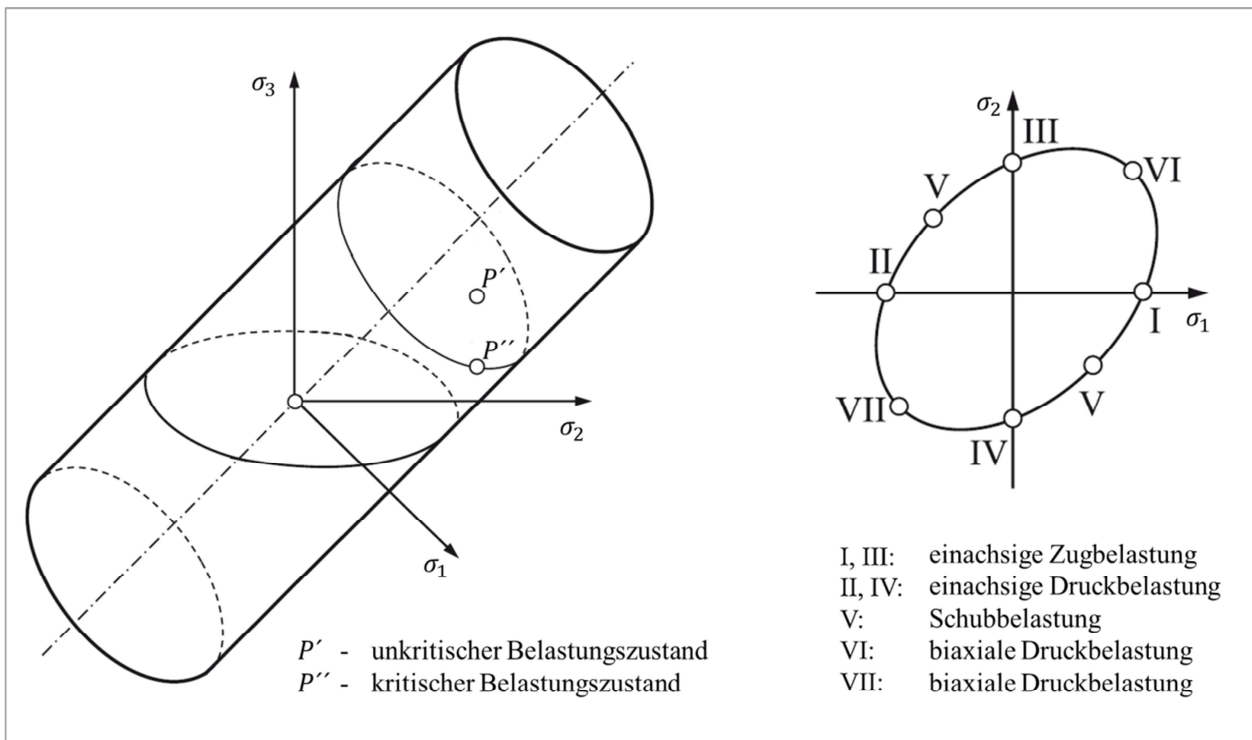


Abbildung 6.4: Äquipotenzialfläche des von Mises-Kriteriums im Hauptspannungsraum [2]

Für den schubspannungsfreien Hauptnormalspannungsraum kann die von Mises-Vergleichsspannung gemäß Gleichung (6.10) formuliert werden. In Gleichung (6.11) ist darüber hinaus die allgemeingültige Form mit Koordinatenspannungen angegeben [2].

$$\sigma_{V \text{ Mises Haupt}} = q_{vM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (6.10)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{V \text{ Mises allg}} &= q_{vM} \\ &= \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 - \sigma_{11} \cdot \sigma_{22} - \sigma_{11} \cdot \sigma_{33} - \sigma_{22} \cdot \sigma_{33} + 3 \cdot (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)} \end{aligned} \quad (6.11)$$

Das von Mises-Kriterium wird vorrangig zur Vorhersage des Versagens infolge von Fließen bei metallischen Werkstoffen verwendet. Durch die Anwendung dieses Kriteriums wird davon ausgegangen, dass

das Versagen allein aus dem deviatorischen Spannungsanteil resultiert und nicht aus dem hydrostatischen Anteil. Dies wird durch die Form der Äquipotenzialfläche deutlich. Die Raumdiagonale des Hauptnormalspannungsraumes stellt alle hydrostatischen Belastungszustände ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) dar. Die zylindrische Äquipotenzialfläche des Kriteriums ist an ihren Stirnseiten offen (siehe Abbildung 6.4 links). Das bedeutet, dass die Versagensfläche im Zug- und im Druckbereich nicht begrenzt ist, sodass weder bei hydrostatischer Druck- noch bei hydrostatischer Zugbeanspruchung plastisches Fließen eintritt, da der resultierende Spannungszustand nie auf oder außerhalb der Fläche liegen kann. Um Fließen infolge von hydrostatischer Werkstoffbeanspruchung abbilden zu können, muss die Äquipotenzialfläche des verwendeten Kriteriums mindestens einen Schnittpunkt mit der Raumdiagonale besitzen. Aus den Eigenschaften des von Mises-Kriteriums ergeben sich für die Anwendung bei Kunststoffen einige Besonderheiten. Zum einen wird ein Thermoplast unter hydrostatischer Zugbelastung zwangsläufig durch Abgleiten der Molekülketten versagen. Dies führt dazu, dass die Belastbarkeit des Thermoplasts bei hydrostatischer Zugbelastung überschätzt wird. Zum anderen wird beim von Mises-Kriterium der Einfluss von Zug- und Druckbeanspruchungen durch das Quadrieren der Normalspannungsanteile gleich bewertet (siehe Gleichung (6.11)). Bei der Bewertung der berechneten Vergleichsspannung ist dann nicht mehr erkennbar, ob sie aus Druck- oder Zugbeanspruchung resultiert. Aus diesem Grund sollten bei der Verwendung des von Mises-Kriteriums immer zusätzlich die Hauptspannungen überprüft werden, da hier das Vorzeichen berücksichtigt wird. Trotz der genannten Einschränkungen kann das von Mises-Kriterium zur Dimensionierung von bei Raumtemperatur duktilen Kunststoffen eingesetzt werden. Bei spröden Kunststoffen oder in Bereichen mit ausgeprägtem mehraxialen Spannungszustand sollte das Normalspannungskriterium verwendet werden [2].

### 6.3.3 Hill-Fließkriterium

Hill [141] [142] hat ein Kriterium entwickelt, das plastisches Fließen in Verbindung mit anisotropem Materialverhalten berücksichtigt. Das Kriterium ist eine Weiterentwicklung der von Mises-Spannung. Zur Berücksichtigung der Anisotropie hat Hill das von Mises-Fließkriterium um sechs Anisotropiekonstanten (F, G, H, L, M, N) erweitert. In einem Koordinatensystem, das mit dem Koordinatensystem, das die anisotropen Eigenschaften beschreibt, zusammenfällt, lässt sich das Hill-Fließkriterium gemäß Gleichung (6.12) beschreiben [139] [143] [144].

$$f(\sigma_{ij}, \sigma_y) = q_H - \sigma_y = 0 \quad (6.12)$$

mit:

- $q_H$  = Hill-Vergleichsspannung nach Gleichung (6.13)
- $\sigma_{ij}$  = Spannung in der jeweiligen Richtung
- $\sigma_y$  = Referenz-Fließspannung

Die Hill-Vergleichsspannung berechnet sich gemäß Gleichung (6.13) [139].

$$\begin{aligned} \sigma_{V \text{ Hill}} &= q_H \\ &= \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2(L \cdot \sigma_{23}^2 + M \cdot \sigma_{31}^2 + N \cdot \sigma_{12}^2)} \end{aligned} \quad (6.13)$$

Die Konstanten F, G, H, L, M, N beschreiben die Richtungsabhängigkeit und werden über die Fließspannungsverhältnisse ( $R_{ij}$ ) bestimmt. Die Werte können anhand der nachfolgenden Gleichungen berechnet werden [143]:

Konstanten zur Beschreibung der Richtungsabhängigkeit

$$F = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \quad (6.14) \quad \left| \quad L = \frac{3}{2} \left( \frac{1}{R_{23}^2} \right) \quad (6.15)$$

$$G = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \quad (6.16) \quad \left| \quad M = \frac{3}{2} \left( \frac{1}{R_{13}^2} \right) \quad (6.17)$$

$$H = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (6.18) \quad \left| \quad N = \frac{3}{2} \left( \frac{1}{R_{12}^2} \right) \quad (6.19)$$

Konstanten zur Beschreibung der Fließspannungsverhältnisse

$$R_{11} = \frac{\sigma_{11}^y}{\sigma_y} \quad (6.20) \quad \left| \quad R_{12} = \frac{\sigma_{12}^y}{\tau_y} \quad (6.21)$$

$$R_{22} = \frac{\sigma_{22}^y}{\sigma_y} \quad (6.22) \quad \left| \quad R_{23} = \frac{\sigma_{23}^y}{\tau_y} \quad (6.23)$$

$$R_{33} = \frac{\sigma_{33}^y}{\sigma_y} \quad (6.24) \quad \left| \quad R_{13} = \frac{\sigma_{13}^y}{\tau_y} \quad (6.25)$$

mit:

- $\sigma_y$  = Referenz-Fließspannung
- $\tau_y$  = Referenz-Schub-Fließspannung
- $\sigma_{iy}^y$  = Fließspannungen in der jeweiligen Richtung

Die Referenz-Schub-Fließspannung kann gemäß Gleichung (6.26) unter Zuhilfenahme des Schubspannungsfaktors ( $f_\tau$ ) vereinfacht aus der Referenz-Fließspannung berechnet werden [74]

$$\tau_y = f_\tau \cdot \sigma_y \quad (6.26)$$

mit:

- $f_\tau$  = Schubspannungsfaktor
- $f_{\tau\_duktil}$  = 0,577 (für duktile Werkstoffe)
- $f_{\tau\_spröde}$  = 0,74 (für spröde Werkstoffe)

Für den Sonderfall der Isotropie  $F = G = H = 0,5$  und  $L = M = N = 1,5$  fällt das Hill-Fließkriterium mit dem von Mises-Kriterium zusammen. Zur Bestimmung der R-Werte müssen sechs Werkstoffprüfungen (drei uniaxiale Zugversuche, drei biaxiale Schubversuche) durchgeführt werden. Als Referenz-Fließspannung wird die Spannung einer untersuchten Probe verwendet [2]. Das Hill-Kriterium bezieht die in unterschiedlichen Raumrichtungen ermittelten Fließspannungen jeweils auf eine Referenz-Fließspannung. Auch aus den Eigenschaften des Hill-Kriteriums ergeben sich für die Anwendung bei Kunststoffen einige Besonderheiten. Zug- und Druckspannungen werden gleich bewertet, da die Spannungsanteile wie bei der von Mises-Vergleichsspannung quadriert werden. Eine weitere Besonderheit ist,

dass bei der Erstellung des Materialmodells lediglich die Spannungs-Dehnungs-Kurve für eine Raumrichtung hinterlegt werden kann. Die Möglichkeit zur Definition von unabhängigen Kurven für die jeweiligen Raumrichtungen besteht nicht [145]. Dies hat zur Folge, dass das Hill-Kriterium nicht für Werkstoffe geeignet ist, bei denen die Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve in den jeweiligen Raumrichtungen sehr unterschiedlich ist.

## **6.4 Charakterisierung der Vorgehensweise zur Entwicklung des Beispielbauteils**

Das Bauteil, das im Rahmen dieser Dissertation zur Durchführung von Prototyp- und Bauteilversuchen verwendet wird, ist das Funktionselement einer Ausgleichskupplung (siehe Abschnitt 1.3). Im systematischen Entwicklungsprozess dieses Bauteils wird in der Konzeptphase zunächst ein kunststoffgerechtes Bauteilkonzept (Funktionsprototyp) und in der Entwurfsphase ein spritzgießgerechtes Bauteil (Technischer Prototyp) erarbeitet. Sowohl die Drehmomentbelastbarkeit des Funktionsprototyps als auch die des Technischen Prototyps wird im Rahmen dieser Arbeit mithilfe von Torsionssteifigkeitsversuchen an lasergesinterten Bauteilen analysiert.

### **6.4.1 Funktionsprototyp**

Bei der Produktentwicklung steht die funktionale und mechanische Auslegung der Bauteile im Mittelpunkt. Allerdings müssen bei der Erstellung eines kunststoffgerechten Bauteilkonzepts noch weitere Aspekte berücksichtigt werden. Diese zusätzlichen Anforderungen, die sich aus dem Werkstoff und dem damit verbundenen Fertigungsverfahren ergeben, sind genauso wichtig wie die beanspruchungsgerechte Bauteilauslegung [5]. Zu einem frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess ist es allerdings schwierig, alle Anforderungen einer beanspruchungs- sowie werkstoff- und fertigungsgerechten (spritzgießgerechten) Konstruktion zu berücksichtigen. Jedoch sollten bereits bei der Konzeption eines Spritzgießteils, zusätzlich zu den beanspruchungsspezifischen Aspekten, die grundlegenden werkstoffgerechten Gestaltungsregeln beachtet werden, um im weiteren Verlauf nicht zu viele geometrische Änderungen vornehmen zu müssen. Die wichtigsten Gestaltungsregeln für thermoplastische Kunststoffteile gemäß [5] [51] [146] sind nachfolgend aufgeführt.

- Wanddicke des Formteils so dünn wie möglich und so dick wie nötig gestalten
- Gleichmäßige Wanddicken vorsehen
- Masseanhäufungen vermeiden
- Ausrundungsradien vorsehen
- Versteifungselemente (Rippen, Sicken) einbringen

### **Werkstoffgerechtes Bauteilkonzept des Funktionselements der Ausgleichkupplung**

Das Ausgleichselement der Kupplung ist ein flächiges Bauteil mit geringer Dicke. Abbildung 6.5 zeigt das werkstoffgerechte Bauteilkonzept. Unter realen Betriebsbedingungen wird das Funktionselement der Kupplung durch ein Torsionsmoment und eine definierte Verformung belastet. Beide Belastungen werden durch Zylinderstifte, die die Klemmnaben der Kupplung mit dem Funktionselement verbinden, in das Funktionselement eingeleitet (siehe Abbildung 1.3 auf Seite 7). Die Stifte der An- bzw. Abtriebsnabe werden bei der Montage der Kupplung jeweils in zwei gegenüberliegende Bohrungen des Ausgleichselements gesteckt. Aufgrund der eingeleiteten Torsionsbelastung ist davon auszugehen, dass die größten

Belastungen in der Ebene des Bauteils und nicht in Dickenrichtung auftreten. Die Geometrie des Funktionsprototyps wird nachträglich um einen kleinen Steg zur Definition der Ausrichtung im Sinterprozess erweitert (siehe Abbildung 6.5).

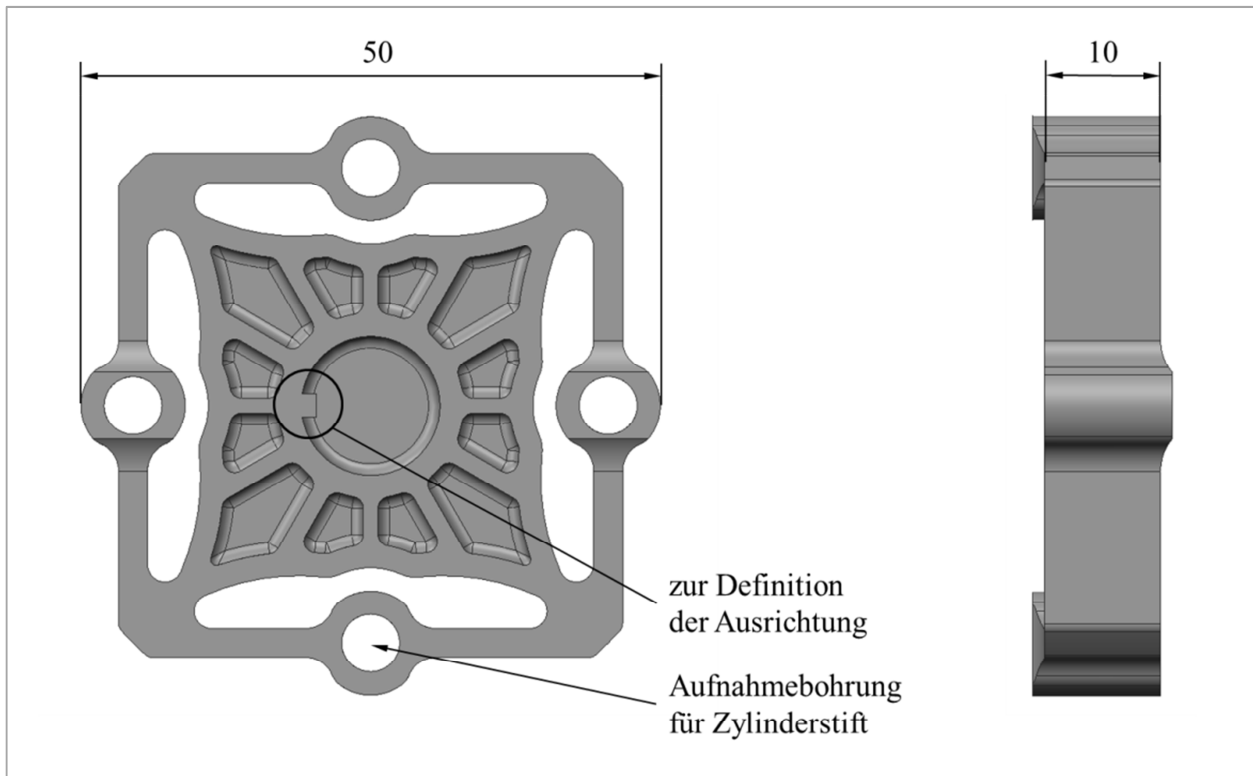


Abbildung 6.5: Funktionsprototyp des Mittelelements der neu entwickelten Ausgleichkupplung

#### 6.4.2 Technischer Prototyp/Serienteil

Für die optimale Herstellbarkeit des Funktionselements im Spritzgießverfahren müssen zusätzlich zu den zuvor genannten Gestaltungsregeln einer werkstoffgerechten Konstruktion weitere Gestaltungsprinzipien berücksichtigt werden. Die wichtigsten Merkmale einer spritzgießgerechten Konstruktion, deren Berücksichtigung die Voraussetzung für ein fertigungsgerechtes, verzugsarmes und beanspruchungsgerechtes Spritzgießbauteil ist, sind nachfolgend aufgeführt [5] [51] [146] [147].

- Entformungsschragen vorsehen
- Hinterschnitte vermeiden
- Anspritzpunkt in dickwandige Bereiche legen
- Gleichmäßige Füllung und gleichlange Fließwege realisieren
- Gleichmäßige Temperierung und Abkühlung ermöglichen
- Freie und gleichmäßige Schwindung ermöglichen
- Molekül- und Faserorientierungen beanspruchungsgerecht beeinflussen
- Anzahl der Bindenähte minimieren
- Unvermeidbare Bindenähte in gering belastete Bauteilbereiche legen
- Überlaufkavitäten zur Durchströmung von Bindenähten vorsehen

### **Fertigungsgerechtes Bauteilkonzept des Funktionselements der Ausgleichkupplung**

Die ersten Füllsimulationen, die mit der Geometrie des Funktionsprototyps durchgeführt werden, ergeben, dass es im Bereich der Parallelenker zu starkem Verzug kommt (siehe Abbildung 6.6 links). Aufgrund dieses unerwünschten Verzugs wird die Geometrie des Funktionsprototyps noch weiter optimiert. Das Ziel der Geometrieoptimierung ist die Minimierung des Bauteilverzugs durch konstruktive Maßnahmen. Durch das Hinzufügen eines äußeren Bogens kann das Einfallen der Parallelenker verhindert werden (siehe Abbildung 6.6 rechts).

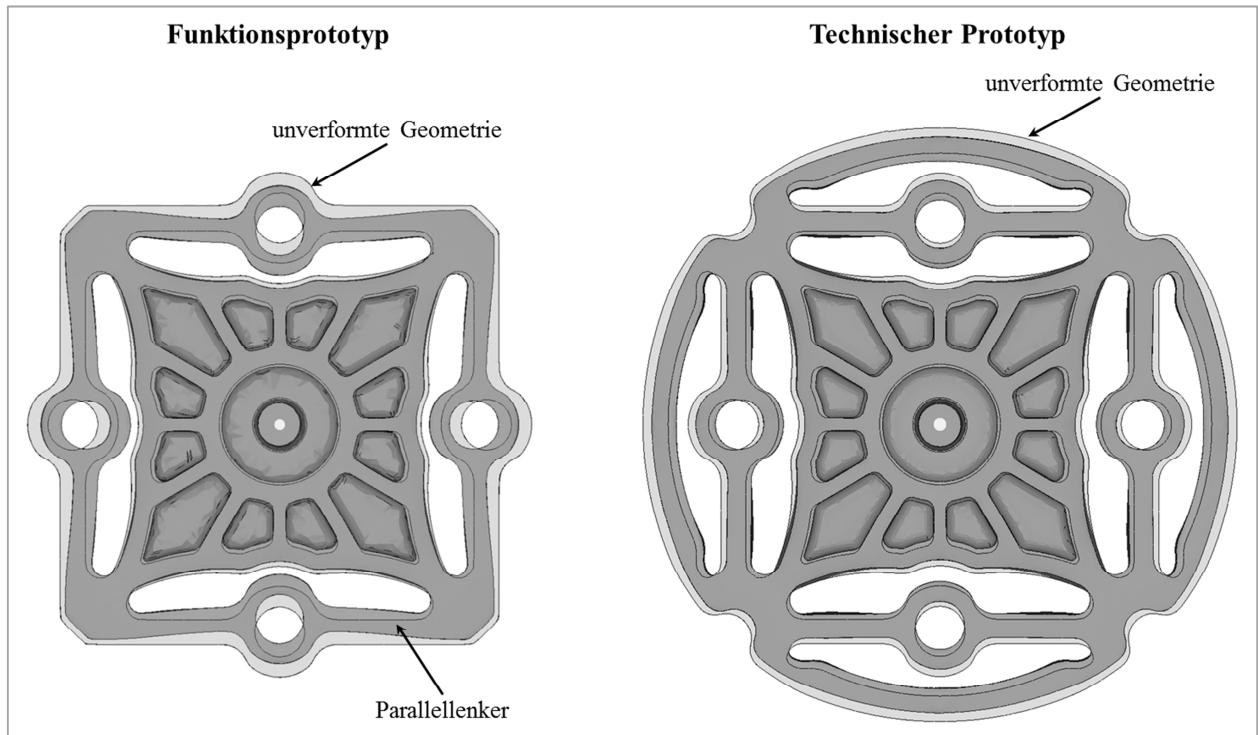


Abbildung 6.6: Simulationsergebnis der Verarbeitungsdeformation für den Funktionsprototyp und den technischen Prototyp

Die gleichmäßige Schwindung des optimierten Bauteils, die durch die erläuterte konstruktive Maßnahme erreicht wird, kann bei der Konstruktion des Spritzgießwerkzeugs relativ einfach durch die Berücksichtigung eines globalen Skalierungsfaktors kompensiert werden. Durch die Berücksichtigung dieses Faktors wird die Maßhaltigkeit des späteren Spritzgießteils sichergestellt.

## **6.5 Charakterisierung der Randbedingungen des Bauteilversuchs**

Zur Verifikation von Simulationsergebnissen und zur Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK werden im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich zu den Ergebnissen aus diversen Zugversuchen Ergebnisse aus Bauteilversuchen benötigt. Aus diesem Grund werden das Kraft-Verformungs-Verhalten und die Drehmomentbelastbarkeit des zuvor beschriebenen Funktionselements der Ausgleichkupplung in Kurzzeitversuchen analysiert. Der verwendete Torsionssteifigkeitsprüfstand ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Das erforderliche Drehmoment wird durch Handkraft erzeugt und durch ein Schneckenradgetriebe verstärkt. Während des gesamten Versuchs werden das aktuell vorhandene Drehmoment und der daraus resultierende Verdrehwinkel des Prüflings gemessen und aufgezeichnet. Auf diese Weise kann nicht nur das Bruchmoment des Prüflings, sondern die vollständige Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurve ausgewertet werden.

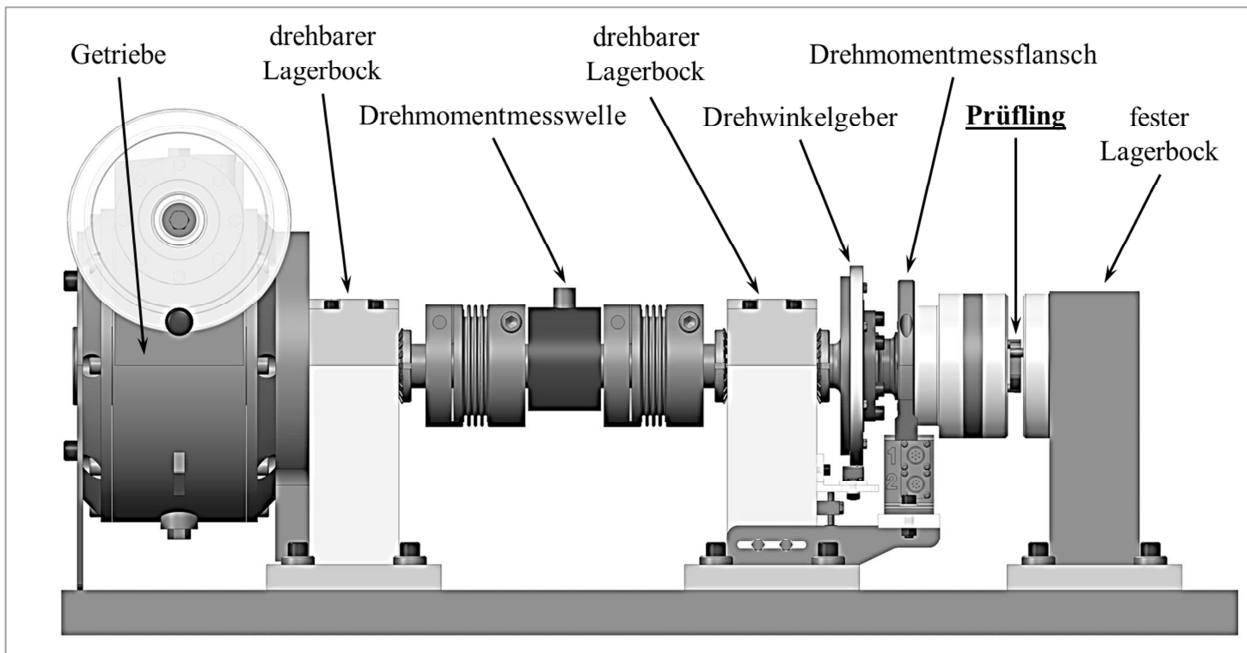


Abbildung 6.7: CAD-Modell des verwendeten Torsionssteifigkeitsprüfstands

## 6.6 Struktursimulation und Bauteilversuch

In diesem Abschnitt wird durch die Gegenüberstellung von Simulations- und Versuchsergebnissen analysiert, welche Art von Materialmodell benötigt wird, um das Kurzzeitverhalten von lasergesinterten Bauteilen korrekt zu simulieren. Dieser Schritt ist notwendig, um lasergesinterte Prototypen zukünftig zur Verifikation von Simulationsergebnissen einsetzen zu können. Die Herausforderung bei der Simulation der mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten Kunststoffbauteilen ist zum einen die Wahl des für die jeweilige Berechnungsaufgabe richtigen Materialmodells und zum anderen die Berücksichtigung der in Kapitel 5 quantifizierten Einflussfaktoren. Insbesondere die anisotropen Materialeigenschaften (siehe Abschnitt 5.2) und der deutlich ausgeprägte Einfluss der Wasseraufnahme (siehe Abschnitt 5.3) müssen bei der Erstellung eines Materialmodells für lasergesintertes PA 12 GK berücksichtigt werden.

Zur Simulation von kurzzeitigen Bauteilbelastungen an Kunststoffbauteilen werden gemäß Tabelle 6.1 elastische oder elastisch-plastische Materialmodelle eingesetzt. Da sowohl die Spannungs-Dehnungs-Kurven des Sinterpolyamids als auch die des Spritzgusspolyamids einen ausgeprägten nicht linear elastischen Verlauf haben (siehe Unterabschnitt 2.6.4), wird in dieser Arbeit nur auf elastisch-plastische Materialmodelle eingegangen. Im Folgenden wird sowohl die Eignung des isotropen von Mises-Kriteriums als auch die des anisotropen Hill-Kriteriums zur Simulation des Kurzzeitverhaltens von lasergesinterten Kunststoffbauteilen aus PA 12 GK ausführlich diskutiert. Die Definition der Materialmodelle erfolgt mithilfe der Ergebnisse der grundlegenden Werkstoffcharakterisierung (siehe Kapitel 5).

### 6.6.1 Isotropes Fließkriterium

Die Charakterisierung des Einflusses der Ausrichtung in Abschnitt 5.2 hat ergeben, dass die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem PA 12 GK, das im Fertigungsprozess durch die Verwendung der Kreuz-Strategie (siehe Unterabschnitt 3.4.3) verarbeitet wird, transversal-isotrop sind. Aufgrund der ermittelten Anisotropie in Baurichtung kann das Verhalten von lasergesinterten Bauteilen nicht vollstän-

dig durch ein isotropes Fließkriterium beschrieben werden. Ob das isotrope von Mises-Fließkriterium dennoch zur Simulation des Kraft-Verformungs-Verhaltens von flächigen Bauteilen, die im Bauprozess parallel zur Bauplattform, also innerhalb der Isotropieebene des transversal-isotropen Materialverhaltens, positioniert werden und auf die keine nennenswerten Belastungen in Z-Richtung einwirken, ausreichend ist, wird mithilfe der Versuchsergebnisse aus Kurzzeit-Torsionssteifigkeitsversuchen überprüft. Die Versuche zur Ermittlung der Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurve des lasergesinterten Funktionsprototyps werden an luftfeuchten Bauteilen durchgeführt, die im Sinterprozess flach in der XY-Ebene orientiert sind. Zur Abschätzung der Reproduzierbarkeit der Bauteileigenschaften werden nachfolgend Prototypen von zwei unterschiedlichen Sinterexperten untersucht.

Die Geometrie des Funktionselements der Ausgleichskupplung ist so aufgebaut, dass die Parallelenker in Form eines geschlossenen Quadrats angeordnet sind. In der Mitte des Quadrats befindet sich ein Kreuz, das unter Torsionsbelastung die Verformung verringert. Durch das von der Kupplungsnahe über die Zylinderstifte eingeleitete Torsionsmoment wird eine Diagonale auf Zug und die andere auf Druck beansprucht (siehe Abbildung 6.8). Im Torsionssteifigkeitsversuch versagen die Funktionsprototypen durch Bruch der auf Zug belasteten Diagonale. Im rechten Teil der Abbildung 6.8 ist zu sehen, dass bei dem Funktionsprototyp von EXP\_2 auch einer der Parallelenker gebrochen ist. Dieser Defekt ist eine unmittelbare Folge des Bruchs der Diagonale.

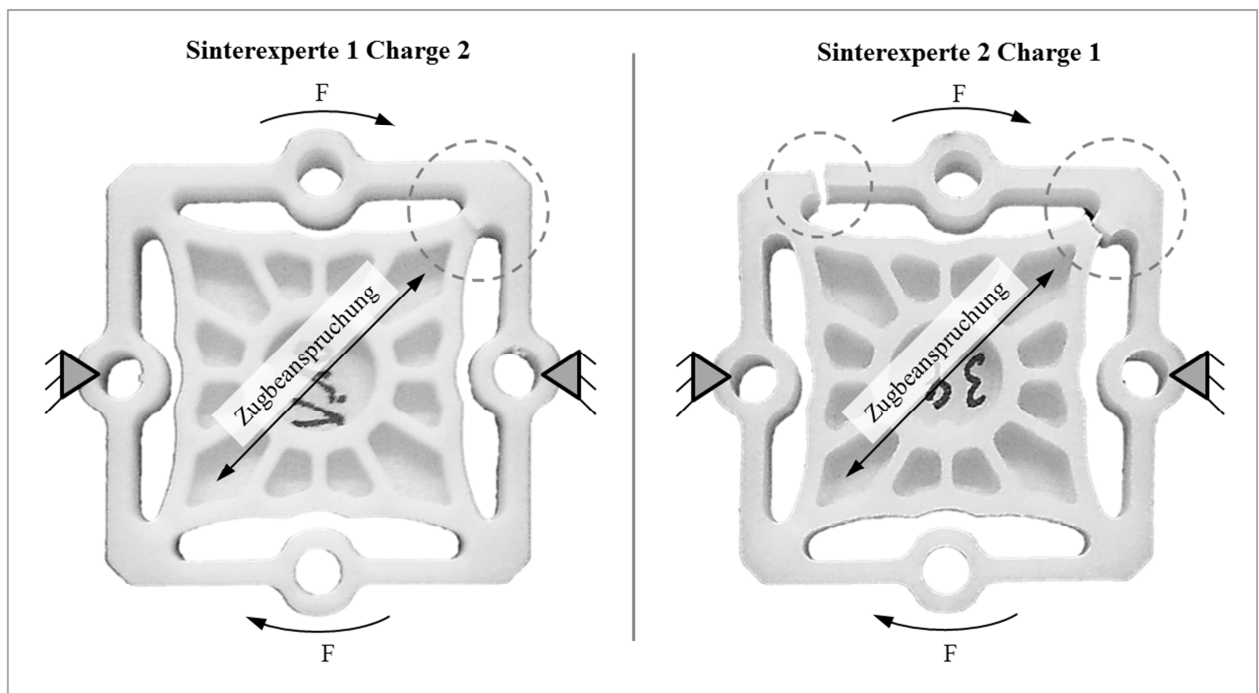


Abbildung 6.8: Belastungsrichtung und Ort des Versagens im Torsionsversuch

Die Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven der lasergesinterten Funktionsprototypen aus PA 12 GK sind in Abbildung 6.9 dargestellt. Die Versuchsreihen spiegeln die Ergebnisse der Charakterisierung des Einflusses des Sinterexperten (siehe Abschnitt 5.6) sehr gut wider. Die Prototypen von EXP\_2 erreichen geringere Bruchmomente und geringere Bruchwinkel als die Teile von EXP\_1.



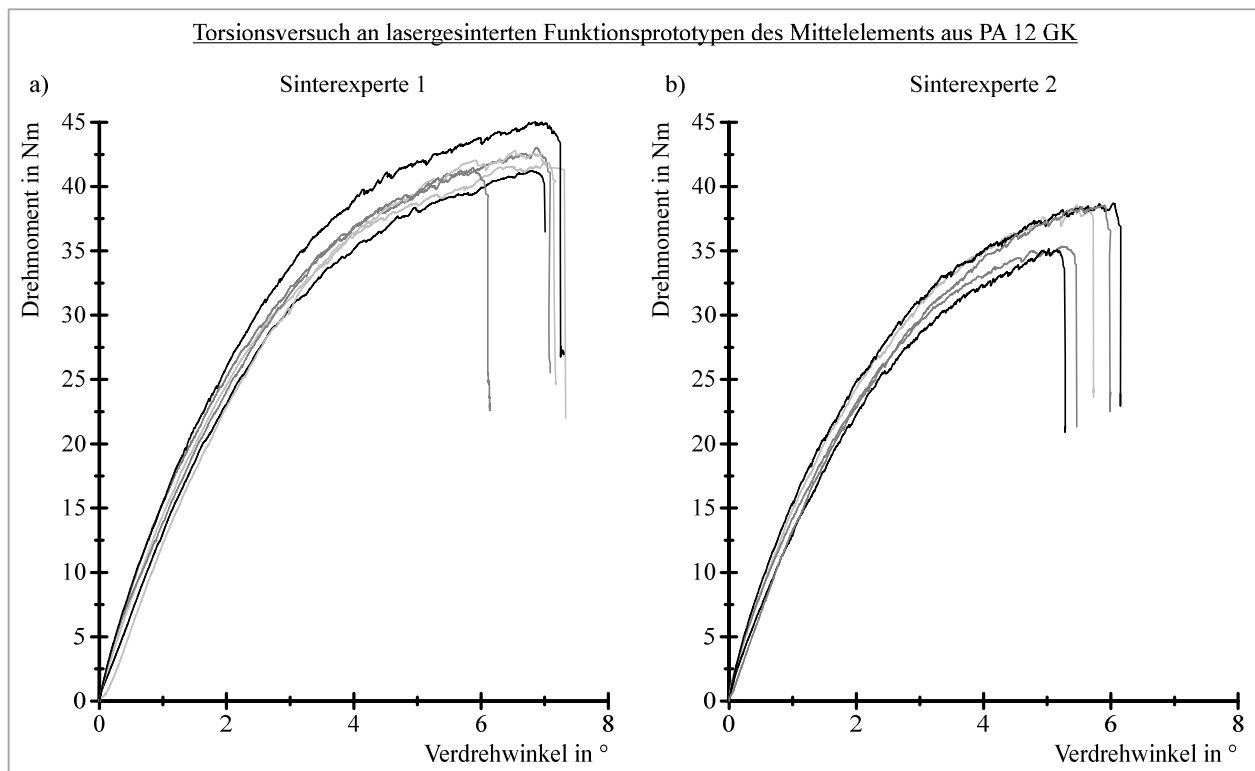


Abbildung 6.9: Versuchsergebnisse der Torsionsversuche an lasergesinterten Funktionsprototypen

Die Messkurven der lasergesinterten Funktionsprototypen von EXP\_1 liegen sehr nah zusammen. Lediglich die Drehmoment-Verdrehwinkel-Messkurve eines Prototyps weicht etwas von den restlichen fünf Kurven ab und erreicht ein höheres Bruchmoment. Auch die Versuchsergebnisse der Prototypen von EXP\_2 liegen sehr nah zusammen. Das Bruchdrehmoment und der Verdrehwinkel beim Bruch der lasergesinterten Prototypen sind in Tabelle 6.2 in der Übersicht dargestellt. Der arithmetische Mittelwert des Bruchmoments der Bauteile von EXP\_2 liegt 12,3 % unter dem Bruchmoment der Teile von EXP\_1. Der Bruchwinkel der Teile von EXP 2 ist um 17,4 % geringer. Die prozentualen Veränderungen des Bruchdrehmoments und des Bruchwinkels liegen in der gleichen Größenordnung wie die Veränderung der Zugfestigkeit und die der Dehnung bei Zugfestigkeit der lasergesinterten Probestäbe infolge des Wechsels des Sinterexperten (siehe Abschnitt 5.6).

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Prototypversuche

Übersicht der Ergebnisse der Torsionssteifigkeitsversuche an lasergesinterten Funktionsprototypen				
Sinterexperte	EXP_1		EXP_2	
Nr.	Bruchdrehmoment	Bruchwinkel	Bruchdrehmoment	Bruchwinkel
	in Nm	in °	in Nm	in °
1	43,0	7,1	38,6	5,7
2	41,2	7,0	35,4	5,5
3	41,6	6,9	35,2	5,3
4	42,8	7,3	38,7	6,2
5	41,3	6,1	38,5	6,0
6	45,1	7,3		
Mittelwert	42,5	7,0	37,3	5,7
Standardabweichung	1,5	0,4	1,8	0,4
Abweichung	Bezugsgröße	Bezugsgröße	-12,3 %	-17,4 %

### Struktursimulation mit isotropem Fließkriterium

Die Überlagerung der Versuchs- und Simulationsergebnisse ist in Abbildung 6.10 dargestellt. In den Diagrammen sind drei simulierte Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven zu sehen, denen unterschiedliche Materialmodelle zugrunde liegen.

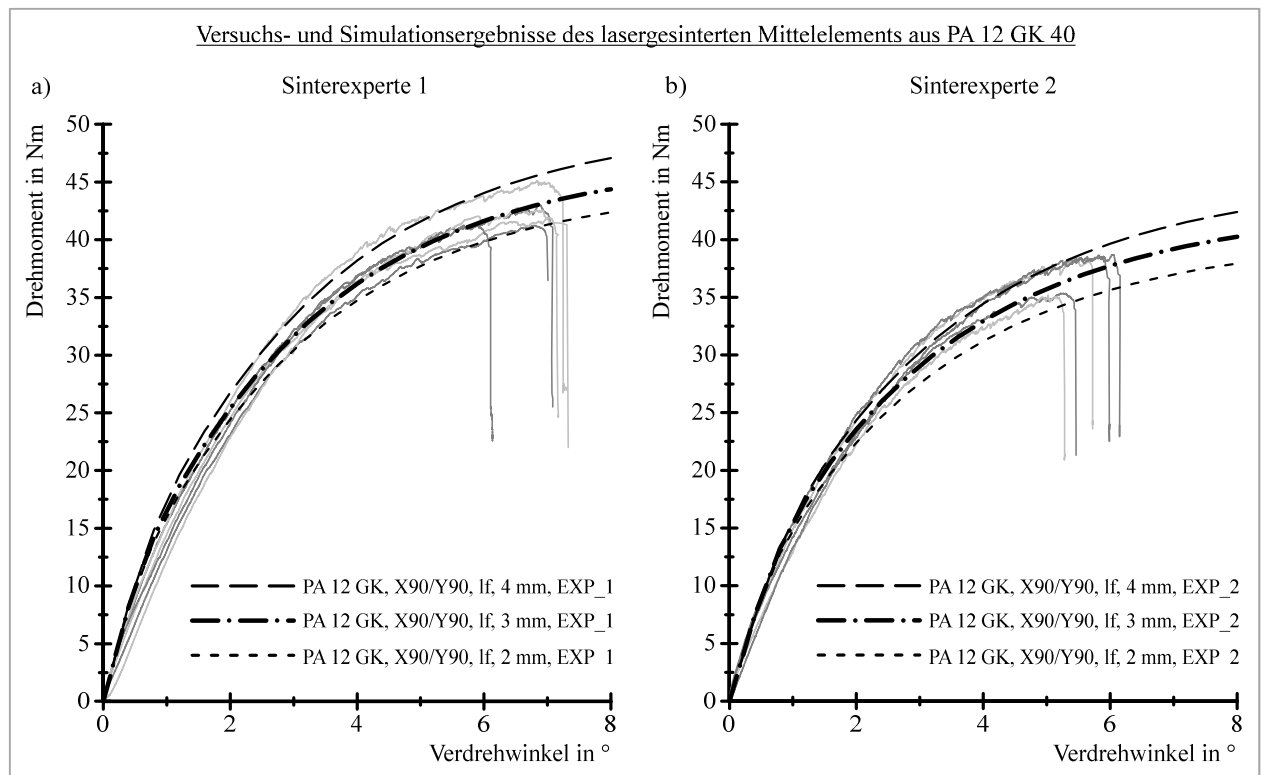


Abbildung 6.10: Überlagerung der Versuchs- und Simulationsergebnisse

Das erste Materialmodell basiert auf den Versuchsergebnissen der 4 mm dicken Probestäbe, deren Oberfläche im Sinterprozess senkrecht zur Bauplattform orientiert war. Die Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven der Prototypen von EXP\_1 zeigen, dass dieses Materialmodell die Steifigkeit des Ausgleichselements tendenziell etwas überinterpretiert. Im Gegensatz dazu wird das Bauteilverhalten durch das Materialmodell, das auf den Versuchsergebnissen der 2 mm dicken und hochkant angeordneten Probestäbe basiert, als zu weich abgebildet. Die beste Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch wird mit einem Materialmodell für 3 mm dicke und hochkant angeordnete Probestäbe erreicht. Dieses Materialmodell wird durch Interpolation aus den Versuchsergebnissen der 2 und 4 mm dicken Probestäbe erstellt. Der Grund für die gute Übereinstimmung ist, dass die Wandstärke der am höchsten beanspruchten Bauteilbereiche zwischen 2,5 und 3 mm liegt. Somit spiegelt das Materialmodell der 3 mm dicken Probestäbe die geometrischen Verhältnisse des realen Bauteils am besten wider. Dieses Ergebnis zeigt, wie wichtig es ist, die mechanischen Eigenschaften des Sintermaterials genau zu charakterisieren, um Abweichungen zwischen Simulation und Versuch korrekt zu interpretieren. Abbildung 6.11 zeigt die von Mises-Vergleichsspannung und die maßstabsgerechte Verformung des Funktionsprototyps bei einem Verdrehwinkel von 8°.

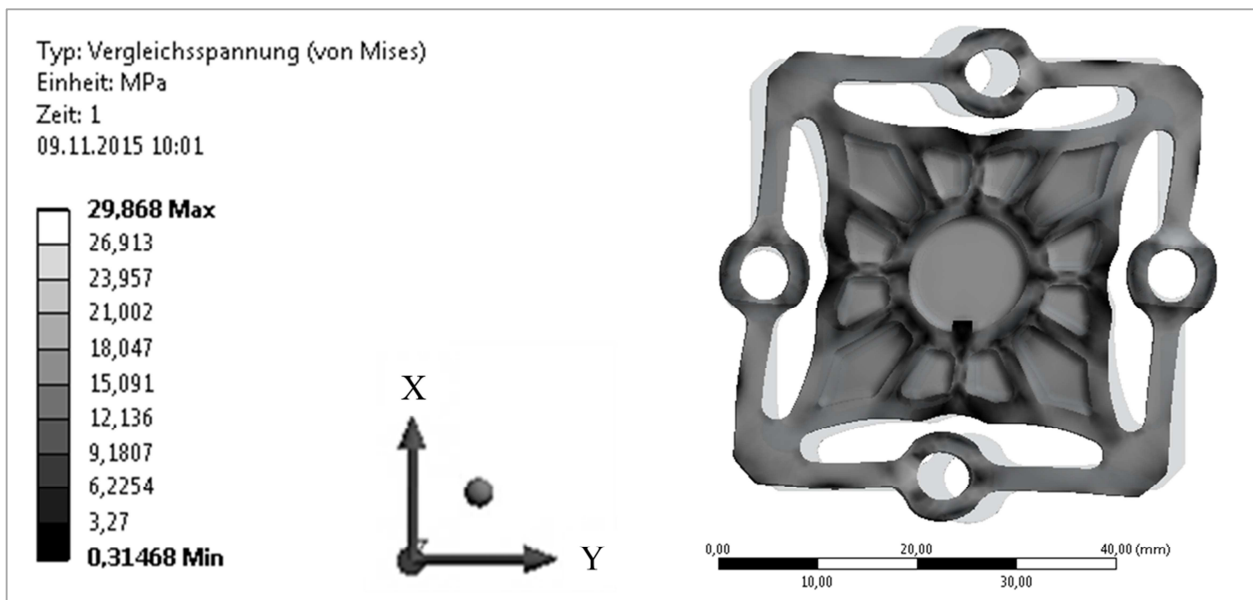


Abbildung 6.11: Wahre von Mises-Vergleichsspannung im Funktionselement der Kupplung

Der Vergleich der Versuchsergebnisse der XY-Bauteile mit den Simulationsergebnissen, die mit dem isotropen von Mises-Fließkriterium ermittelt wurden, zeigt, dass sich das Verhalten von flächigen Bauteilen, die im Sinterprozess parallel zur Bauplattform ausgerichtet sind, sehr gut abbilden lässt. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, wie wichtig es ist, ein Materialmodell zu verwenden, das die geometrischen Verhältnisse des realen Bauteils berücksichtigt.

### 6.6.2 Anisotropes Fließkriterium

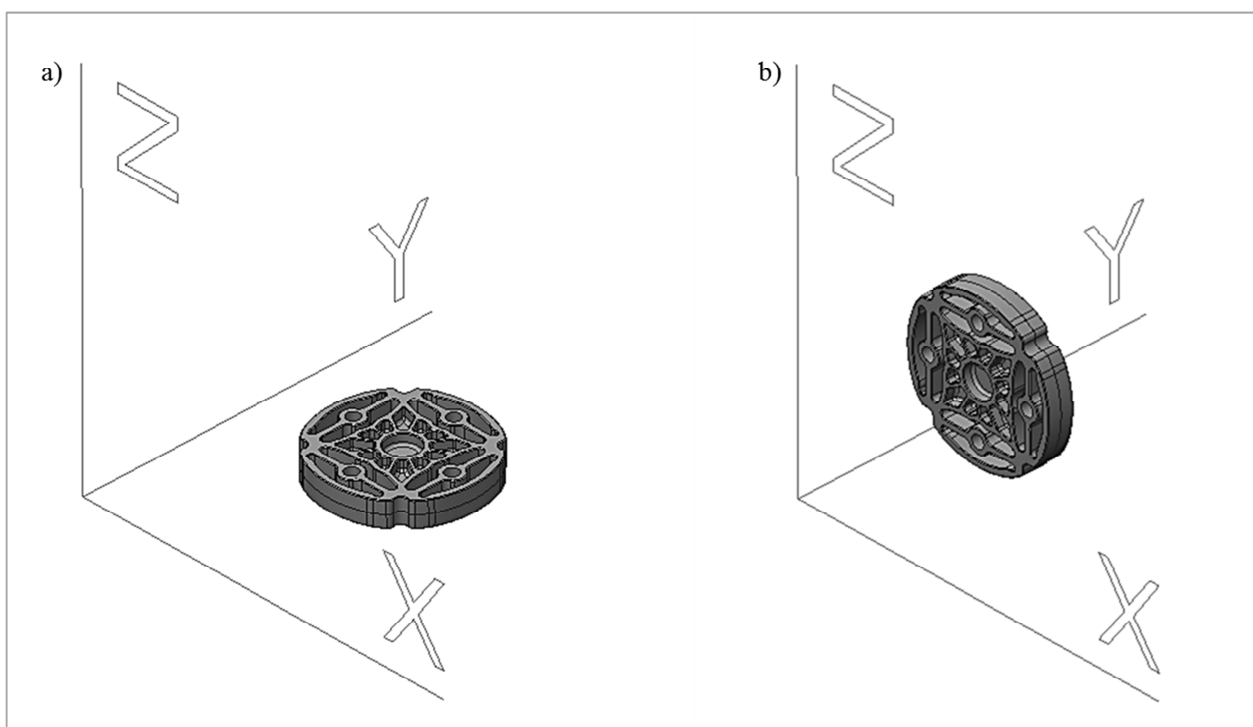


Abbildung 6.12: Ausrichtung des Mittelelements im dreidimensionalen Bauraum der Sinteranlage

Zur Abbildung der anisotropen Eigenschaften von Lasersinterbauteilen wird ein Materialmodell benötigt, das transversal-isotropes Materialverhalten abbilden kann. Nachfolgend wird diskutiert, ob sich das in

Unterabschnitt 6.3.3 vorgestellte Hill-Fließkriterium zur Simulation des Kurzzeitverhaltens von dreidimensional ausgerichteten Bauteilen eignet. Die benötigten Bauteilversuche zur Untersuchung des Kraft-Verformungs-Verhaltens werden mit Technischen Prototypen durchgeführt, deren Form der Geometrie des späteren Spritzgießbauteils (siehe Unterabschnitt 6.4.2) entspricht. Zur Untersuchung der Richtungsabhängigkeit der Bauteileigenschaften werden die Teile im Lasersinterprozess sowohl flach (XY-Ebene) als auch hochkant (XZ-Ebene) im Bauraum der Sinteranlage angeordnet (siehe Abbildung 6.12). Die Versuche werden mit luftfeuchten Sinterbauteilen von EXP\_1 durchgeführt.

Die Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven der technischen Prototypen zeigen, dass die Bauteile, die im Sinterprozess parallel zur XY-Ebene angeordnet sind, ein höheres Bruchdrehmoment und einen größeren Bruchwinkel erreichen als die parallel zur XZ-Ebene orientierten Bauteile (siehe Abbildung 6.13).

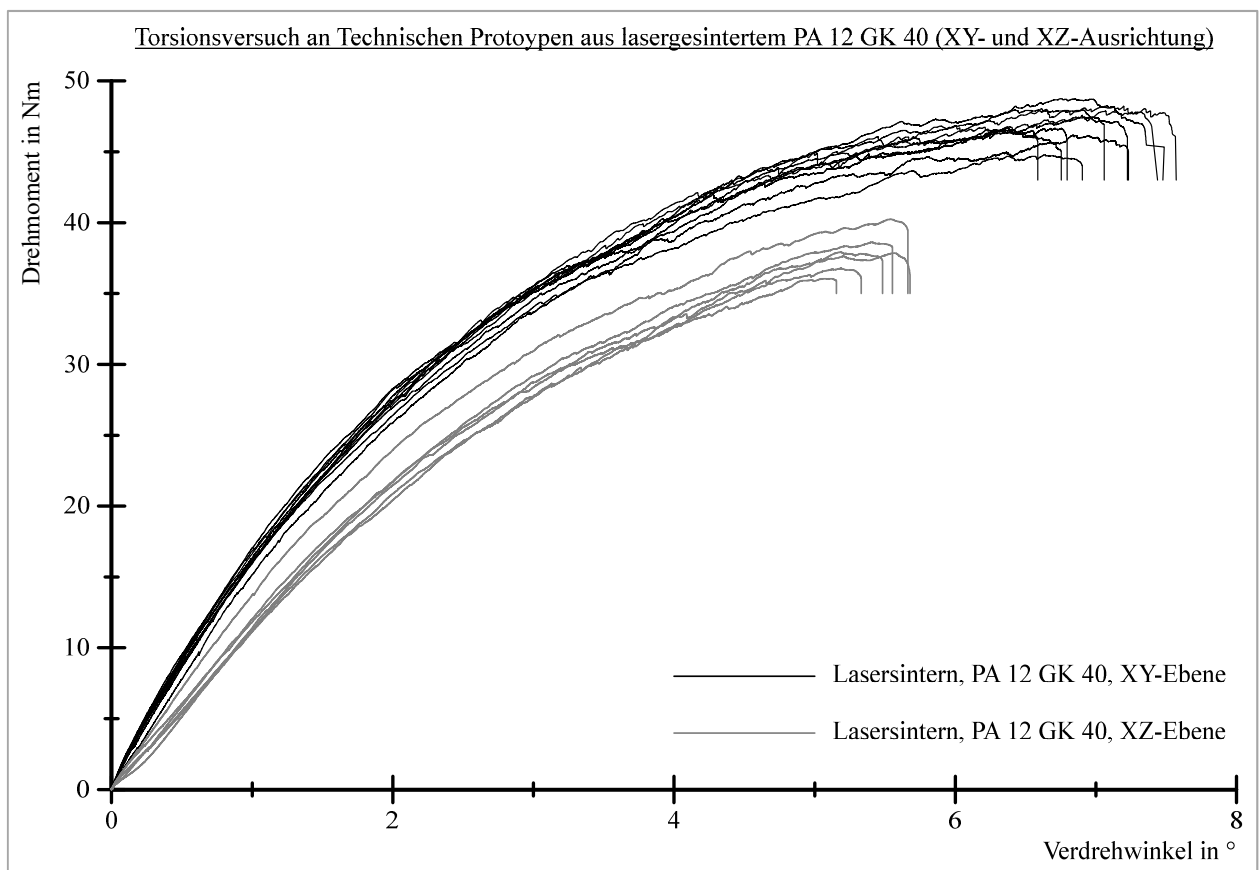


Abbildung 6.13: Versuchsergebnisse der Torsionsversuche an technischen Prototypen des Funktionselements der Ausgleichskupplung mit unterschiedlicher Ausrichtung im Sinterprozess

Die Kurven der Bauteile mit gleicher Ausrichtung liegen jeweils sehr nah zusammen. Lediglich der Kurvenverlauf eines XZ-Prototyps weicht etwas von den Kurven der restlichen Bauteile ab. Das Bruchdrehmoment und der Verdrehwinkel beim Bruch der technischen Prototypen sind in Tabelle 6.3 in der Übersicht dargestellt. Sowohl der arithmetische Mittelwert des Bruchdrehmoments als auch der des Bruchwinkels der XZ-Bauteile sind wie erwartet geringer als die Werte der XY-Bauteile. Die prozentuale Veränderung der beiden Kennwerte liegt in der gleichen Größenordnung wie die richtungsabhängige Änderung der Zugfestigkeit bzw. der Dehnung bei Zugfestigkeit von lasergesinterten Probestäben (siehe Abschnitt 5.2). Die Ergebnisse der Bauteilversuche zeigen sehr deutlich, wie wichtig es ist, die Bauteilausrichtung im Sinterprozess bewusst zu wählen und bei der Bewertung von Versuchsergebnissen zu berücksichtigen.

Tabelle 6.3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Bauteilversuche

Übersicht der Ergebnisse der Torsionssteifigkeitsversuche an lasergesinterten Technischen Prototypen				
Sinterexperte	EXP_1; XY-Ebene		EXP_1; XZ-Ebene	
Nr.	Bruchdrehmoment	Bruchwinkel	Bruchdrehmoment	Bruchwinkel
	in Nm	in °	in Nm	in °
1	46,2	7,3	36,8	5,5
2	46,4	6,8	36,1	5,3
3	46,7	6,8	38,6	5,6
4	48,3	7,5	37,9	5,5
5	48,0	7,7	37,9	5,8
6	44,8	7,0	40,3	5,7
7	48,0	7,2		
8	48,8	7,5		
9	47,4	7,3		
10	46,6	6,8		
Mittelwert	47,1	7,2	37,9	5,6
Standardabw.	1,2	0,3	1,5	0,1
Abweichung	Bezugsgröße	Bezugsgröße	-19,5 %	-22,3 %

### Struktursimulation mit anisotropem Fließkriterium

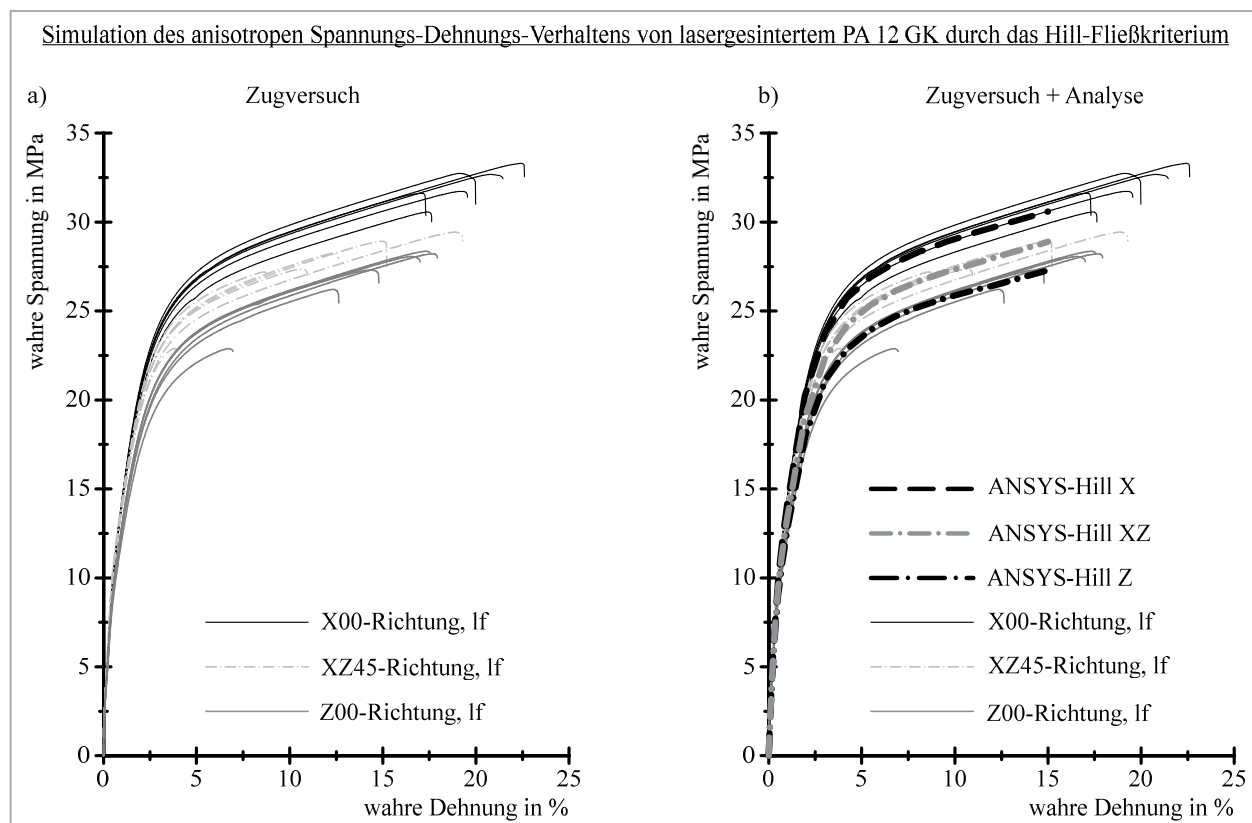


Abbildung 6.14: Abbildung des anisotropen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von lasergesinterten Probestäben mithilfe des Hill-Fließkriteriums

Die mechanischen Eigenschaften des glaskugelgefüllten Sinterpolyamids im dreidimensionalen Raum wurden in Unterabschnitt 5.2.5 charakterisiert und diskutiert. Die Ergebnisse der Materialcharakterisierung werden zur Ermittlung der Hill-Koeffizienten (siehe Unterabschnitt 6.3.3) genutzt. Die Koeffizienten werden benötigt, um das anisotrope Verhalten von lasergesinterten Kunststoffbauteilen mithilfe des Hill-Fließkriteriums in der Struktursimulation abzubilden. Zur Erstellung des Materialmodells werden die

im Zugversuch ermittelten technischen Spannungs-Dehnungs-Kurven anhand des in Unterabschnitt 6.2.3 beschriebenen Vorgehens in wahre Spannungs-Dehnungs-Kurven umgerechnet. Diagramm a) der Abbildung 6.14 zeigt die berechneten wahren Spannungs-Dehnungs-Kurven von unterschiedlich ausgerichteten Sinterproben. Abgebildet sind die Kurven von in X-, XZ- und Z-Richtung orientierten Probestäben. Im Diagramm b) der Abbildung 6.14 ist zu sehen, dass das Hill-Fließkriterium das reale Werkstoffverhalten sehr gut abbildet. Sowohl das Verhalten der X- und Z-Proben als auch das der diagonal orientierten XY45-Probestäbe wird mit guter Übereinstimmung wiedergegeben. Zur Simulation des Drehmoment-Verdrehwinkel-Verhaltens der lasergesinterten Prototypen wird aufgrund des transversal-isotropen Materialverhaltens des Sinterpolyamids in X- und Y-Richtung gleiches Werkstoffverhalten zugrunde gelegt. Für das lasergesinterte PA 12 mit einem Glaskugelgewichtsanteil von 40 % ergeben sich für das Hill-Fließkriterium die in Tabelle 6.4 aufgeführten R-Werte.

Tabelle 6.4: R-Werte zur Beschreibung der Fließspannungsverhältnisse des lasergesinterten PA 12 GK

$R_{11} = 1$	$R_{12} = 1$
$R_{22} = 1$	$R_{23} = 0,87$
$R_{33} = 0,88$	$R_{13} = 0,87$

Die Überlagerung der Versuchs- und Simulationsergebnisse zeigt, dass sowohl das Verhalten der XY-Bauteile als auch das der XZ-Bauteile durch die Verwendung des Hill-Fließkriteriums gut abgebildet wird (siehe Abbildung 6.15).

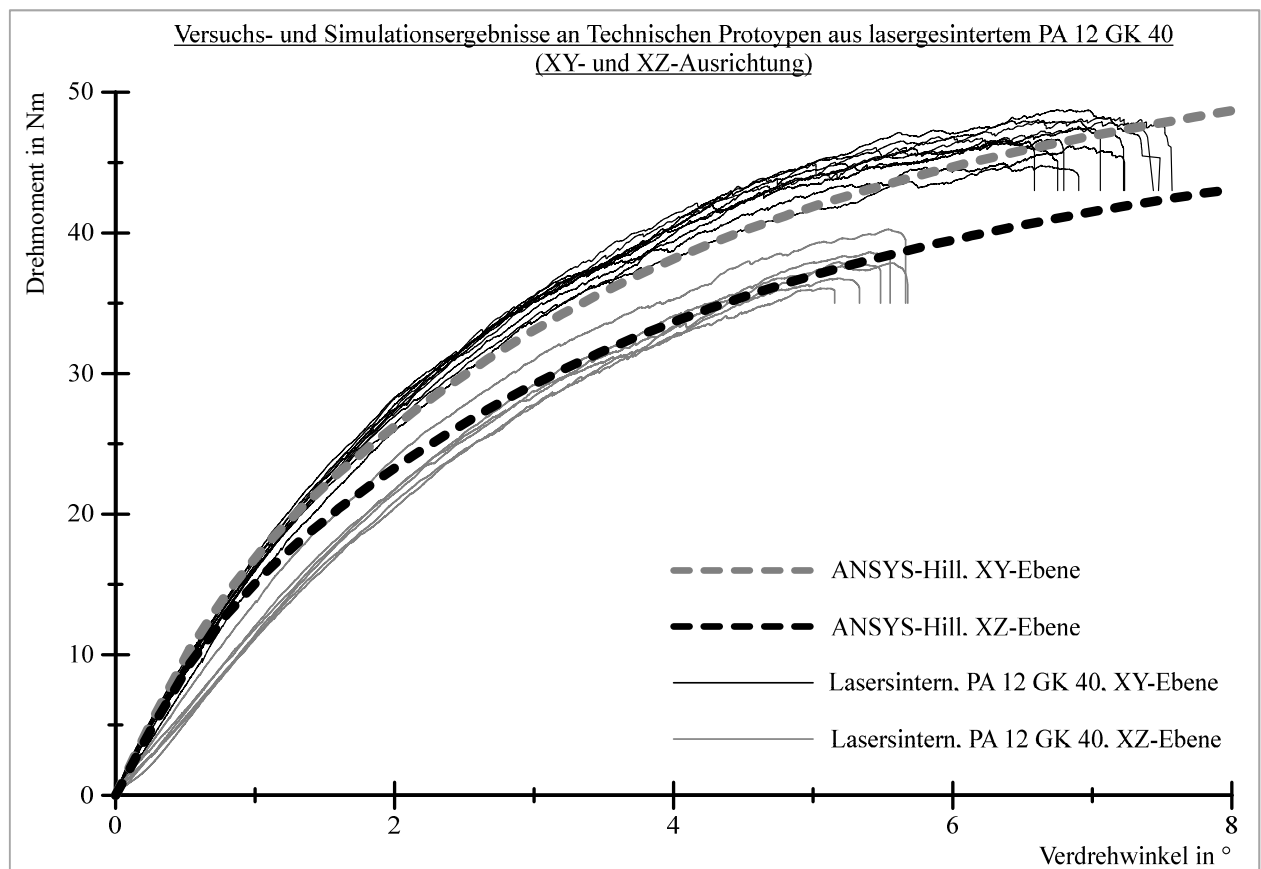


Abbildung 6.15: Versuch- und Simulationsergebnisse der Torsionsversuche an technischen Prototypen des Funktionselements der Ausgleichskupplung mit unterschiedlicher Ausrichtung im Sinterprozess

Anhand der dargestellten Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven wird auch deutlich, dass die Simulation des Bauteilverhaltens von flächigen Bauteilen mithilfe des isotropen von Mises-Fließkriteriums, wie sie

in Unterabschnitt 6.6.1 erläutert wurde, nur dann zulässig ist, wenn zwei Voraussetzungen erfüllt sind. Zum einen dürfen im Bauteil keine größeren Beanspruchungen in Dickenrichtung vorhanden sein, zum anderen muss das Bauteil im Sinterprozess flach in der XY-Ebene ausgerichtet werden. Sowohl die in diesem Unterabschnitt untersuchten XY-Bauteile als auch die XZ-Bauteile sind flächige Teile, die in der Bauteilebene beansprucht werden. Allerdings erfüllen einzig die XY-Bauteile die zweite Voraussetzung, dass das Bauteil im Sinterprozess flächig in der XY-Ebene orientiert sein muss. Aus diesem Grund kann nur das Verhalten der XY-Bauteile und nicht das der XZ-Bauteile mithilfe des isotropen von Mises-Kriteriums beschrieben werden. Zur Simulation der Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurve des XZ-Bauteils muss zwingend ein Fließkriterium wie das Hill-Kriterium verwendet werden, das die transversal-isotropen Materialeigenschaften von lasergesintertem PA 12 GK 40 vollständig abbilden kann. Die Nichtberücksichtigung der Anisotropie in Baurichtung führt bei räumlich orientierten Bauteilen dazu, dass keine bzw. lediglich eine unzureichende Übereinstimmung zwischen Simulation und Bauteilversuch erzielt werden kann.

## 6.7 Bewertung der Versuchsergebnisse zur Simulation des Bauteilverhaltens

In diesem Kapitel wurde diskutiert, wo die Herausforderungen bei der Erstellung von Materialmodellen zur Simulation von Kunststoffbauteilen liegen und welche Art von Materialmodell benötigt wird, um das Kurzzeitverhalten von lasergesinterten Bauteilen aus PA 12 GK 40 richtig zu simulieren. Die direkte Gegenüberstellung von Simulations- und Versuchsergebnissen zeigt, dass unter den nachfolgend genannten Voraussetzungen sowohl das isotrope von Mises-Kriterium als auch das anisotrope Hill-Fließkriterium geeignet sind, um das Kraft-Verformungs-Verhalten von lasergesinterten Kunststoffbauteilen zuverlässig abzubilden. Das Verhalten von im Herstellungsprozess in der XY-Ebene ausgerichteten, flächigen Bauteilen kann trotz der transversal-isotropen Eigenschaften von lasergesintertem PA 12 GK durch die Verwendung des isotropen von Mises-Fließkriteriums simuliert werden, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

1. Das Bauteil muss im Sinterprozess flach in der XY-Ebene ausgerichtet sein
2. Im Bauteil dürfen keine größeren Beanspruchungen in Dickenrichtung vorhanden sein

Die Verwendung des anisotropen Hill-Fließkriteriums ermöglicht die Berücksichtigung der transversal-isotropen Eigenschaften von lasergesinterten Kunststoffbauteilen. Auf diese Weise kann das Kraft-Verformungs-Verhalten von beliebig im Bauraum der Sinteranlage orientierten Bauteilen mithilfe einer strukturmechanischen Simulation ermittelt werden. Die insgesamt sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulations- und Versuchsergebnissen zeigt, dass Bauteilversuche an lasergesinterten Prototypen im Entwicklungsprozess von Spritzgießbauteilen zur frühzeitigen Verifikation von Simulationsergebnissen eingesetzt werden können. Allerdings zeigt die Gegenüberstellung auch, wie wichtig eine grundlegende Charakterisierung der Materialeigenschaften und die Verwendung von Materialkennwerten ist, die an Probestäben ermittelt wurden, die den Konditionierungszustand sowie die geometrischen Verhältnisse des eigentlichen Formteils widerspiegeln. Der besondere Mehrwert der Prototypversuche besteht dabei in der frühzeitigen Absicherung der gewählten Simulationsrandbedingungen. Ob mithilfe der, durch Belastbarkeitsversuche an lasergesinterten Funktionsprototypen verifizierten, Struktursimulation auch das Kraft-Verformungs-Verhalten des späteren Spritzgießteils korrekt abgebildet werden kann, wenn das Materialmodell entsprechend den mechanischen Eigenschaften des Spritzgießmaterials angepasst wird, wird in Abschnitt 7.3 ausführlich diskutiert.

## 7 Analyse des quantitativen Zusammenhangs

Anhand der Ergebnisse von Werkstoff- und Bauteilprüfungen wird in diesem Kapitel der quantitative Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK analysiert. Als Beispielbauteil dient weiterhin das in Kapitel 6 betrachtete Funktionselement der Ausgleichskupplung. Ein wichtiges Merkmal dieser Ausgleichskupplung ist ihre Torsionssteifigkeit. Um eine möglichst hohe Steifigkeit zu erreichen, wird für das Spritzgießbauteil das in Kapitel 5 grundlegend charakterisierte PA 12 mit 50 % Glaskugelanteil als Serienwerkstoff gewählt. Nachfolgend wird deshalb der quantitative Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften des glaskugelgefüllten Sinterpolyamids PA 3200 GF (PA 12 GK 40) von EOS und des Spritzgießwerkstoffs Grilamid LKN 5H (PA 12 GK 50) von EMS betrachtet (Werkstoffe gemäß Tabelle 4.2).

### 7.1 Quantitativer Zusammenhang im Zugversuch

Der direkte Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven zeigt, dass sich die beiden Werkstoffe im Zugversuch je nach Konditionierungszustand unterschiedlich verhalten (siehe Abbildung 7.1). Im sinter- bzw. spritzfrischen Zustand sind die Steifigkeit und die Festigkeit der lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäbe vergleichbar. Im Gegensatz dazu ist die Bruchdehnung der Sinterproben trotz des geringeren Füllgrads wesentlich geringer als die der Spritzgussproben. Diese Untersuchung beweist, dass der Zusammenhang des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben aus PA 12 GK im sinterfrischen Zustand vergleichbar mit dem Zusammenhang ist, der in der Literatur für ungefülltes PA 12 beschrieben wird. In Unterabschnitt 2.6.3 wurde ausführlich dargestellt, dass verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen an ungefülltem PA 12 ergeben haben, dass die Steifigkeit und die Zugfestigkeit von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben vergleichbar sind, wohingegen die Bruchdehnung der lasergesinterten Proben erheblich geringer ist [14] [16] [70] [76].

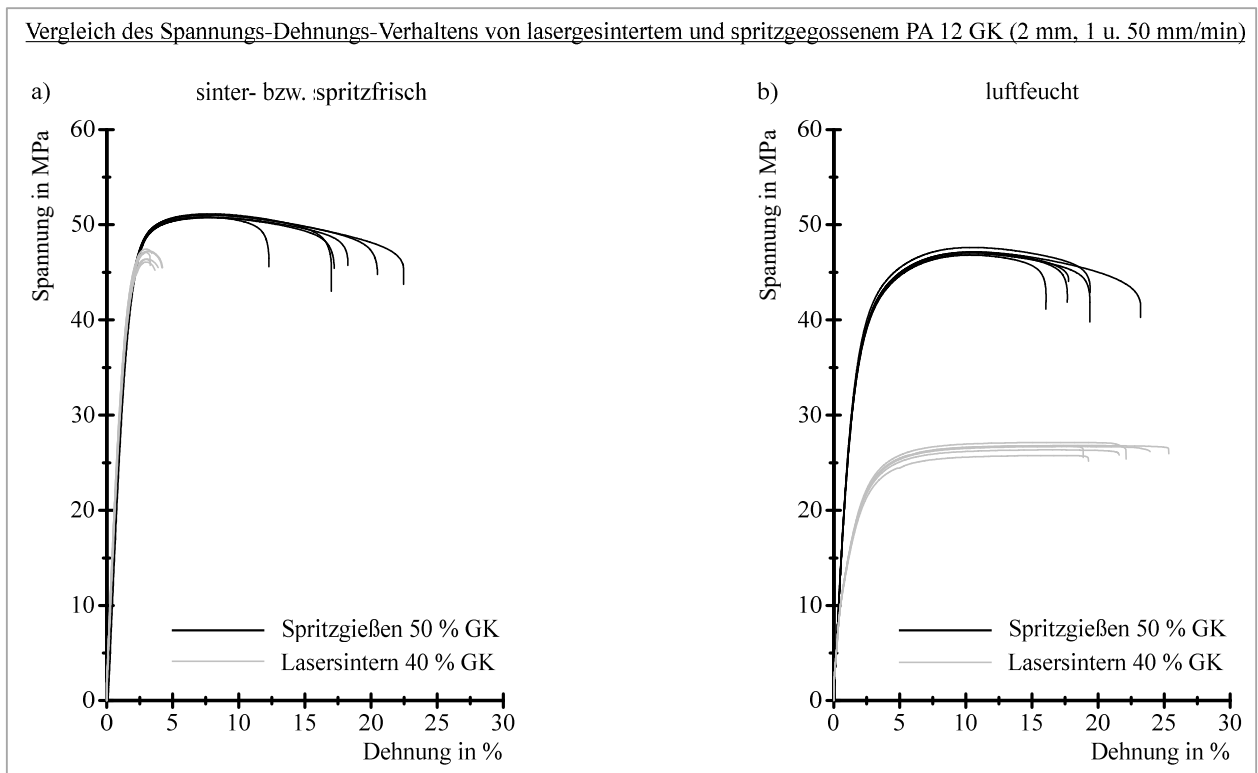


Abbildung 7.1: Vergleich des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK



Für glaskugelgefülltes PA 12 gilt dieser Zusammenhang im luftfeuchten Zustand allerdings nicht. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der luftfeuchten Sinter- bzw. Spritzgießproben zeigen einen deutlich voneinander abweichenden Verlauf. Die Steifigkeit und die Festigkeit der lasergesinterten Probestäbe sind geringer als die der spritzgegossenen Proben. Der Grund für die großen Steifigkeits- und Festigkeitsunterschiede ist der unverhältnismäßig hohe Einfluss der Wasseraufnahme auf die mechanischen Eigenschaften des Sintermaterials (siehe Abschnitt 5.3). Die Wasseraufnahme führt auch dazu, dass die Bruchdehnung beider Materialien im luftfeuchten Zustand in der gleichen Größenordnung liegt.

Zur detaillierten Analyse des quantitativen Zusammenhangs zwischen den Kennwerten Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit werden die jeweiligen Kennwerte nachfolgend direkt miteinander verglichen. In den verwendeten Diagrammen sind jeweils der arithmetische Mittelwert einer Versuchsreihe und die dazugehörige Standardabweichung dargestellt. Die waagerechten, gestrichelten Linien kennzeichnen zusätzlich den arithmetischen Mittelwert der durch die Linie verbundenen Versuchsreihen. Aufgrund der in Abschnitt 5.5 dargestellten Ergebnisse der Werkstoffcharakterisierung wird bei der Analyse sowohl die Anisotropie des Sintermaterials als auch der Einfluss der Dicke des Probekörpers auf die mechanischen Kennwerte berücksichtigt. Alle nachfolgend betrachteten Ergebnisse werden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 und 50 mm/min und luftfeuchten Probestäben ermittelt. Der Grund für die Beschränkung auf die Analyse der Ergebnisse der luftfeuchten Probestäbe ist, dass Formteile aus Polyamid vor dem Gebrauch durch Lagerung in warmem Wasser oder feuchter Luft konditioniert und nicht trocken verwendet werden [148].

### 7.1.1 Quantitativer Zusammenhang Zug-E-Modul

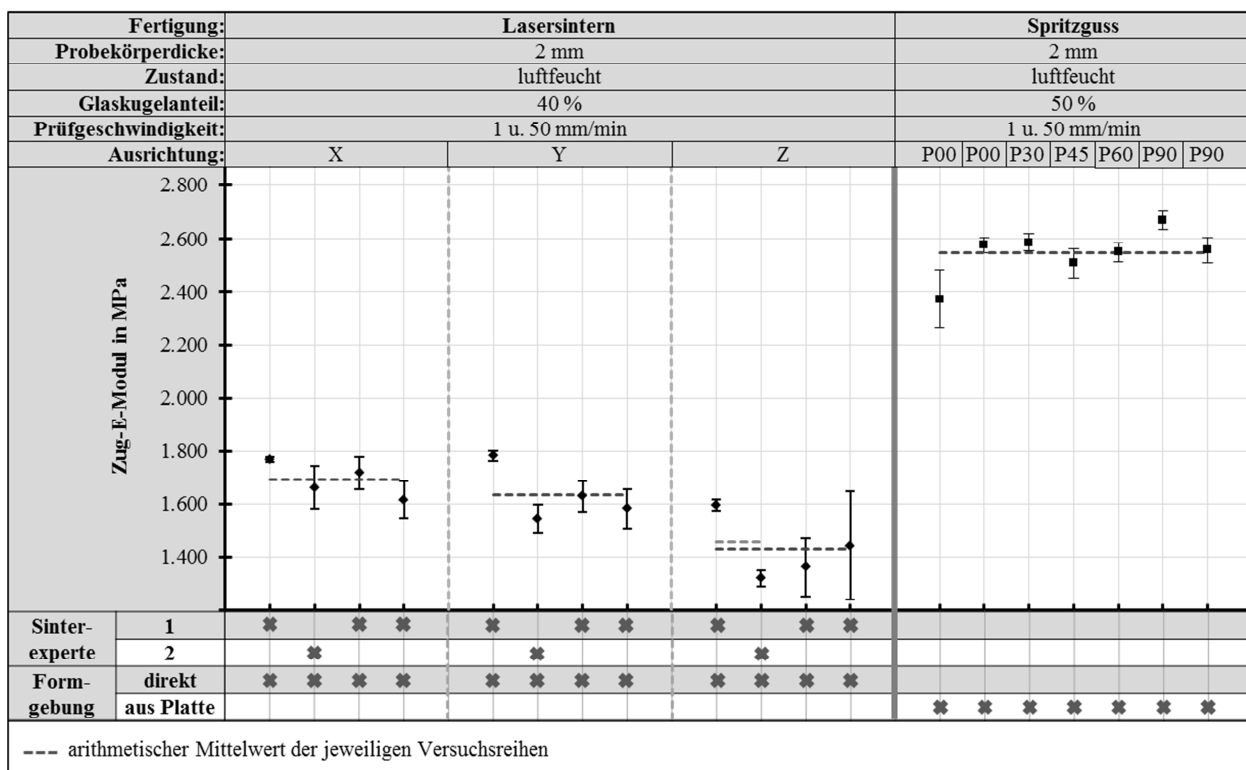


Abbildung 7.2: Zug-E-Modul von lasergesintertem PA 12 GK 40 und spritzgegossenem PA 12 GK 50 im direkten Vergleich; gemessen an 2 mm dicken Probestäben

Sowohl der E-Modul der 2 mm dicken (siehe Abbildung 7.2) als auch der Modul der 4 mm dicken Spritzgussproben (siehe Abbildung 7.3) ist in allen Versuchsreihen größer als der Modul der Sinterproben. Der

arithmetische Mittelwert des E-Moduls der 2 mm dicken Sinterproben liegt ausrichtungsabhängig zwischen 1431 und 1691 MPa, wobei die geringsten Werte in Z-Richtung gemessen wurden. Auffällig ist, dass die Standardabweichung der dritten und vierten Versuchsreihe in Z-Richtung wesentlich größer ist als die der anderen. Der Grund für diese Streuung ist eine große Anzahl von nicht aufgeschmolzenen Partikeln in diesen Probestäben (siehe Unterabschnitt 5.2.5). Da die genannten Versuchsreihen auch hinsichtlich Zugfestigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit auffällige Ergebnisse aufweisen, ist in allen Diagrammen zusätzlich der arithmetische Mittelwert der ersten beiden Versuchsreihen in Z-Richtung eingetragen. Dieser Wert wird auch für den direkten Vergleich in den jeweiligen Balkendiagrammen genutzt. Der arithmetische Mittelwert des E-Moduls der 2 mm dicken Spritzgussproben ist ca. 850 bis 1100 MPa größer als der Modul der Sinterproben (siehe Abbildung 7.2).

Da der E-Modul des Spritzgussmaterials weniger stark durch die Probekörperdicke beeinflusst wird als der des Sintermaterials (siehe Unterabschnitt 5.5.2), ist der Unterschied bei den dickeren Probestäben etwas geringer als bei den dünnen (siehe Abbildung 7.3). Der arithmetische Mittelwert des Elastizitätsmoduls der 4 mm dicken Sinterproben ist um ca. 840 bzw. 690 MPa geringer als der arithmetische Mittelwert des Moduls der Spritzgießproben.

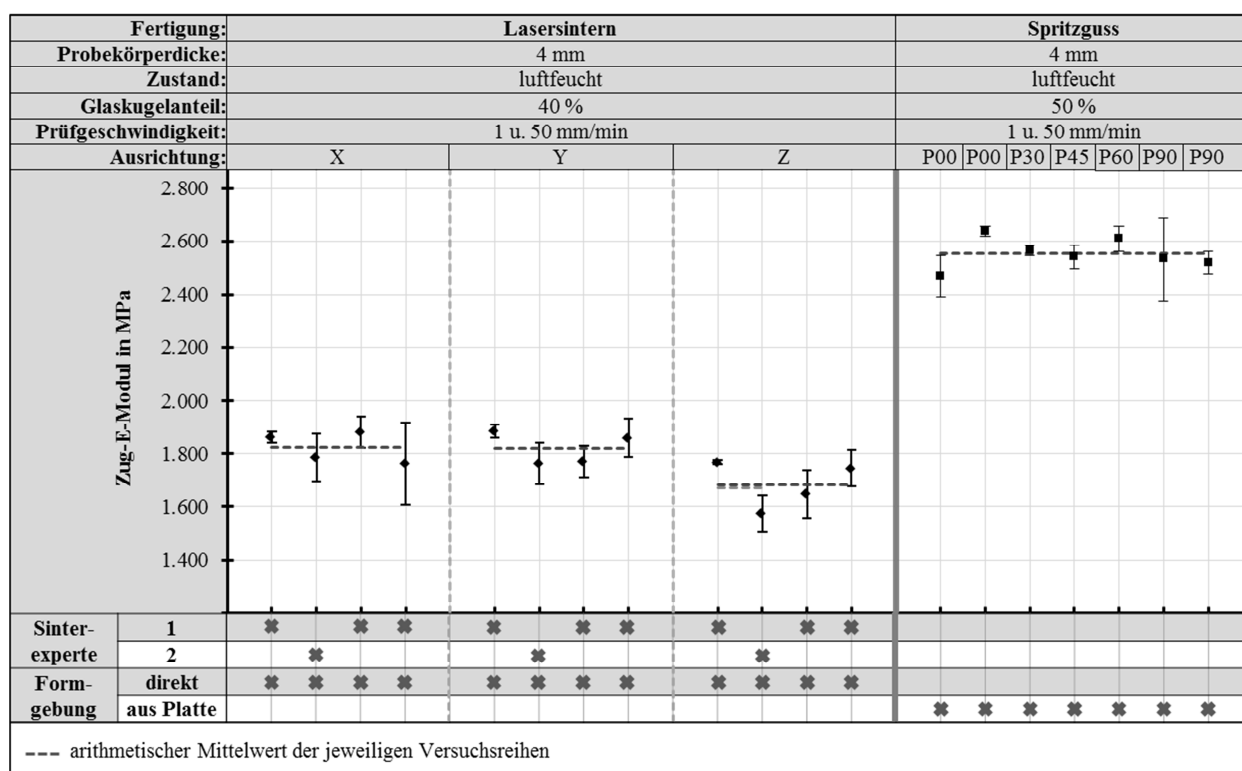


Abbildung 7.3: Zug-E-Modul von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK im direkten Vergleich; gemessen an 4 mm dicken Probestäben

Der prozentuale Unterschied zwischen dem E-Modul der Sinterproben und dem der Spritzgussproben ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Die Auswertung zeigt, dass der E-Modul der spritzgegossenen Probestäbe aus PA 12 GK in Abhängigkeit von der Ausrichtung der Sinterproben um mindestens 40 % größer ist als der Modul der lasergesinterten Probestäbe.

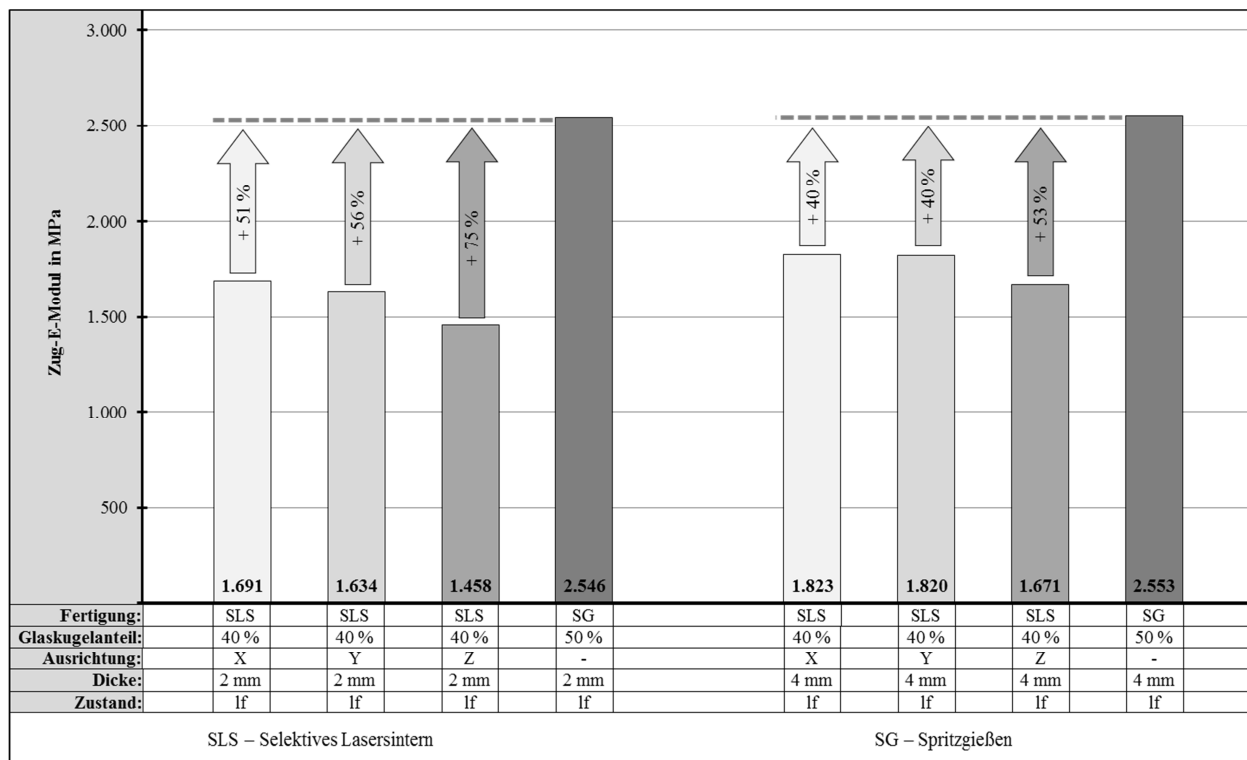


Abbildung 7.4: Prozentualer Unterschied zwischen dem E-Modul der Sinterproben und dem Modul der Spritzgussproben

Die großen Steifigkeitsunterschiede zwischen dem Sinter- und dem Spritzgussmaterial haben zwei Ursachen. Ein Teil des Unterschieds resultiert aus dem unterschiedlich hohen Glaskugelgewichtsanteil der betrachteten Werkstoffe, und der andere Teil ergibt sich durch den sehr stark ausgeprägten Einfluss der Wasseraufnahme auf die Steifigkeit des Sintermaterials (siehe Unterabschnitt 5.3.1). Zur Unterscheidung der beiden Anteile wird an dieser Stelle das mikromechanische Halpin-Tsai-Modell eingesetzt. Mithilfe dieses Modells können die idealisierten, raumrichtungsabhängigen Elastizitätskonstanten eines RVEs mit elastischen Materialeigenschaften, das lediglich aus einer einzelnen Faser besteht, die von Matrix-Material umgeben ist (siehe Abbildung 7.5), abgeschätzt werden [2] [149] [150].

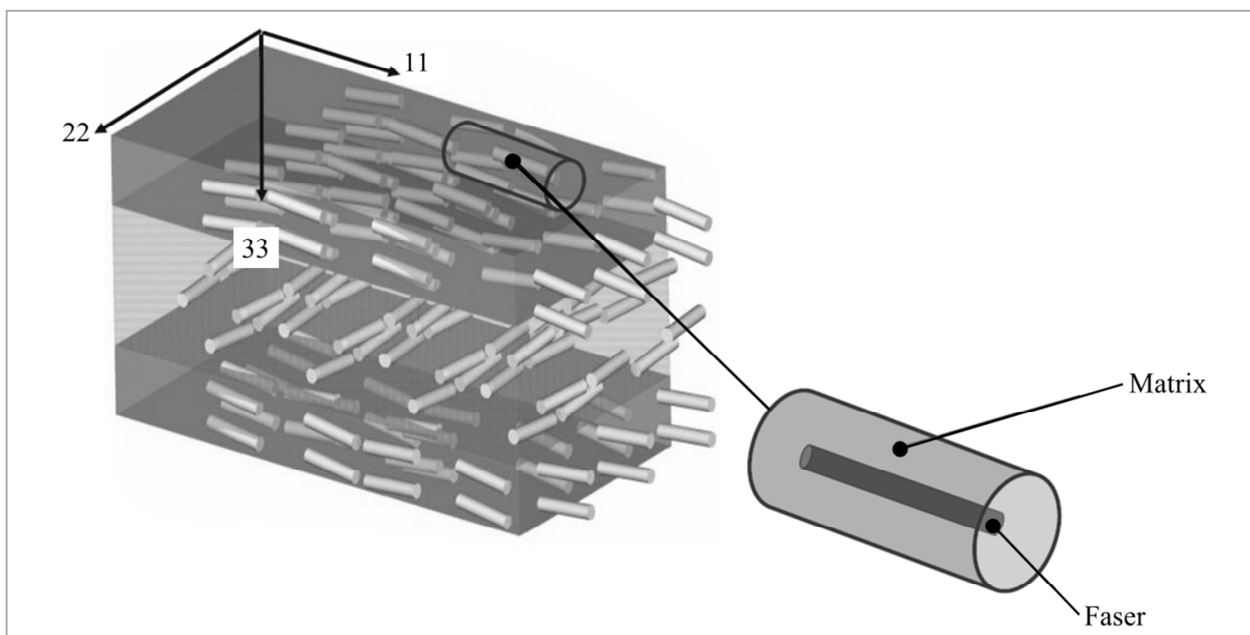


Abbildung 7.5: Repräsentatives Volumenelement bestehend aus einer Faser mit umgebendem Matrix-Material [149]

Bei der Anwendung des Halpin-Tsai-Modells werden folgende Modellannahmen getroffen [149]:

- Faser und Matrix sind ideal-elastisch
- Faser und Matrix sind homogen
- Haftung zwischen Faser und Matrix ist ideal ausgeprägt
- Alle Fasern haben gleiches Aspektverhältnis
- Das RVE erfährt nur kleine Dehnungen

In die Berechnung der Elastizitätskonstanten des RVEs gehen die mechanischen Eigenschaften von Faser und Matrix sowie das Aspektverhältnis der Faser ein. Die anisotropen E-Moduln des RVEs können gemäß Gleichung (7.1) bis (7.6) berechnet werden [2] [149] [150].

$E_{11} = E_m \frac{1 + \xi_{11} \cdot \eta_{ij} \cdot \Phi}{1 - \eta_{ij} \cdot \Phi} \quad (7.1)$		$\eta_{ij} = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi_{ij}} \quad (7.2)$
$E_{22} = E_m \frac{1 + \xi_{22} \cdot \eta_{ij} \cdot \Phi}{1 - \eta_{ij} \cdot \Phi} \quad (7.3)$		$\xi_{11} = 2 \cdot a \quad (7.4)$
$E_{33} = E_{22} \quad (7.5)$		$\xi_{22} = 2 \quad (7.6)$

mit:

- $E_{ij}$  = E-Modul des RVEs in den jeweiligen Raumrichtungen
- $E_m$  = E-Modul der Matrix
- $E_f$  = E-Modul der Faser
- $a$  = Aspektverhältnis der Faser;  $a = l/d$
- $\Phi$  = Faservolumenanteil gemäß Gleichung

$$\Phi = \frac{\Psi}{\Psi + [(1 - \Psi) \cdot \rho_{Faser} \cdot \rho_{Matrix}^{-1}]} \quad (7.7)$$

mit:

- $\Psi$  = Fasergewichtsanteil
- $\rho_{Faser}$  = Dichte Faser
- $\rho_{Matrix}$  = Dichte Matrix

Für die Anwendung des Halpin-Tsai-Modells für glaskugelgefülltes Sinterpolyamid wird an dieser Stelle anstatt des Aspektverhältnisses einer Faser das Aspektverhältnis einer Glaskugel ( $a = 1$ ) verwendet. Anhand des Halpin-Tsai-Modells kann jetzt berechnet werden, wie groß die prozentuale Veränderung des E-Moduls der lasergesinterten Probestäbe ist, wenn das Sintermaterial einen Glaskugelmassenanteil von 50 % und nicht wie real vorhanden von 40 % hat. Bei Verwendung des in Abschnitt 5.1 ermittelten E-Moduls der ungefüllten, lasergesinterten PA 12-Matrix von 1500 MPa ist der mithilfe des Halpin-Tsai-Modells berechnete E-Modul eines RVEs aus PA 12 GK 50 um ca. 20 % höher als der berechnete Modul eines RVEs aus dem in dieser Arbeit betrachteten Sinterpolyamid PA 12 GK 40 (siehe Tabelle 7.1). Der im Vergleich zu den Versuchsergebnissen zu hohe, berechnete E-Modul des Sintermaterials PA 12 GK 40 (Vergleich Tabelle 7.1 und Abbildung 7.4) ist auf die feuchtigkeitsbedingte Herabsetzung der Kugel-Matrix-Haftung zurückzuführen, da das Halpin-Tsai-Modell von einer von der Realität abweichenden ideal ausgeprägten Haftung zwischen Faser und Matrix ausgeht (siehe Unterabschnitt 5.3.4).



ten Einflusses der Dicke des Probestabs auf die mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben ist die Zugfestigkeit der 4 mm dicken Proben in allen Versuchsreihen etwas größer als die der 2 mm dicken Probestäbe. Auch bei den dickeren Stäben ist die Zugfestigkeit der Spritzgussproben annähernd doppelt so hoch wie die der Sinterproben (siehe Abbildung 7.7).

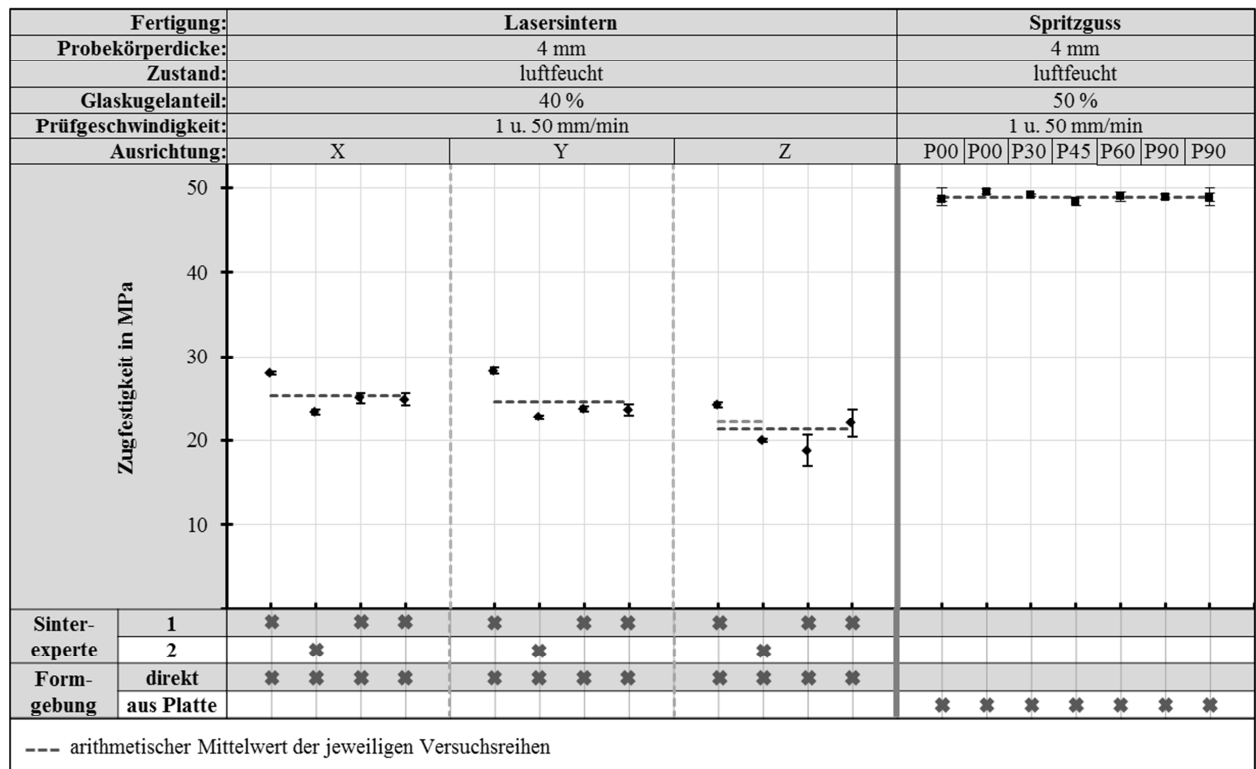


Abbildung 7.7: Zugfestigkeit von lasergesintertem PA 12 GK 40 und spritzgegossenem PA 12 GK 50 im direkten Vergleich; gemessen an 4 mm dicken Probestäben

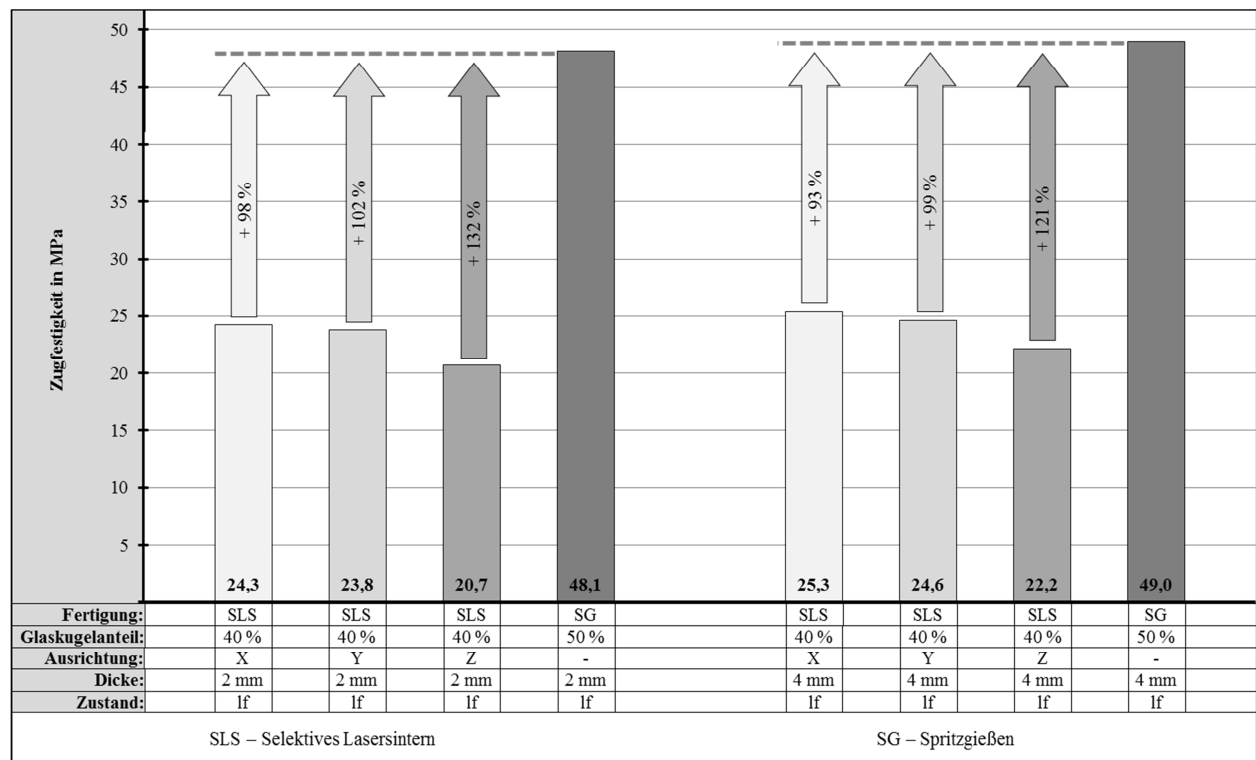


Abbildung 7.8: Prozentualer Unterschied zwischen der Zugfestigkeit der Sinterproben aus PA 12 GK 40 und der Festigkeit der spritzgegossenen Proben aus PA 12 GK 50

Der prozentuale Unterschied zwischen der Zugfestigkeit der Sinterproben und der Festigkeit der Spritzgussproben ist in Abbildung 7.8 grafisch dargestellt. In Abhängigkeit von der Ausrichtung der Sinterproben ist die Festigkeit der Spritzgussproben bei gleicher Dicke um mindestens 93 % größer als die der lasergesinterten Probestäbe. Ein Teil des festgestellten Festigkeitsunterschieds ist durch die festigkeitssteigernde Wirkung der Glaskugeln zu erklären (siehe Abschnitt 5.1), da das Spritzgussmaterial einen um 10 % höheren Glaskugelmassenanteil hat als das Sintermaterial. Durch den höheren Füllgrad ist jedoch nur ein kleiner Teil des Unterschieds zu erklären. Der größere Teil ist, wie bereits bei der Beeinflussung des E-Moduls, auf die unterschiedlich starke Ausprägung des Einflusses der Wasseraufnahme zurückzuführen. Die festigkeitssteigernde Wirkung von Glaskugeln kann nicht mithilfe des Halpin-Tsai-Modells bestimmt werden, da dieses Modell lediglich die Berechnung der ideal-elastischen Materialeigenschaften ermöglicht. Aus diesem Grund kann der Anteil des Festigkeitsunterschieds, der auf den unterschiedlich hohen Glaskugelmassenanteil zurückzuführen ist, an dieser Stelle lediglich durch eine Analogiebetrachtung zur festigkeitssteigernden Wirkung der Glaskugeln beim Spritzgussmaterial abgeschätzt werden. Die Erhöhung des Glaskugelmassenanteils von 30 auf 50 % führt beim Spritzgussmaterial zu einer Festigkeitssteigerung von 9,8 % (siehe Unterabschnitt 5.1.3). Aufgrund dieses Ergebnisses ist davon auszugehen, dass eine Erhöhung des Glaskugelanteils beim Lasersintermaterial von 40 auf 50 % eine Festigkeitssteigerung von weniger als 10 % bewirken wird und das auch nur unter der Voraussetzung einer im Vergleich zum Spritzgussmaterial vergleichbar gut ausgeprägten Kugel-Matrix-Haftung. Da diese beim Sintermaterial ohnehin durch die Wasseraufnahme wesentlich stärker reduziert wird als beim Spritzgussmaterial, ist davon auszugehen, dass der Anteil des unterschiedlich hohen Füllgrads am in Abbildung 7.8 dargestellten Festigkeitsunterschied sehr gering ist. Im schlimmsten Fall kann die Erhöhung des Glaskugelanteils beim Sintermaterial sogar zu einer Reduzierung der Zugfestigkeit führen. Dies ist der Fall, wenn durch die Wasseraufnahme die Kugel-Matrix-Haftung beim Sintermaterial vollständig verloren geht, da der dann noch tragende Matrix-Anteil bei einem Glaskugelanteil von 50 % entsprechend geringer ist.

### 7.1.3 Quantitativer Zusammenhang Dehnung bei Zugfestigkeit

Abbildung 7.9 und Abbildung 7.10 zeigen den direkten Vergleich der Dehnung bei Zugfestigkeit der 2 mm bzw. 4 mm dicken Sinter- und Spritzgießproben. Obwohl die Bruchdehnung der lasergesinterten und der spritzgegossenen Probestäbe vergleichbar ist (siehe Abbildung 7.1), bestehen hinsichtlich der Dehnung bei Zugfestigkeit signifikante Unterschiede. Die Dehnung bei Zugfestigkeit fällt bei den betrachteten Materialien mit der Streckdehnung zusammen und ist sowohl bei den 2 mm dicken als auch bei den 4 mm dicken X- und Y-Sinterproben annähernd doppelt so hoch wie der entsprechende Kennwert der Spritzgießproben. Bei den Z-Proben ist der Unterschied nicht ganz so groß, da die Dehnung bei Zugfestigkeit der Sinterproben aufgrund ihres in Belastungsrichtung schichtweisen Aufbaus geringer ist als in X- und Y-Richtung (siehe Abschnitt 5.2).

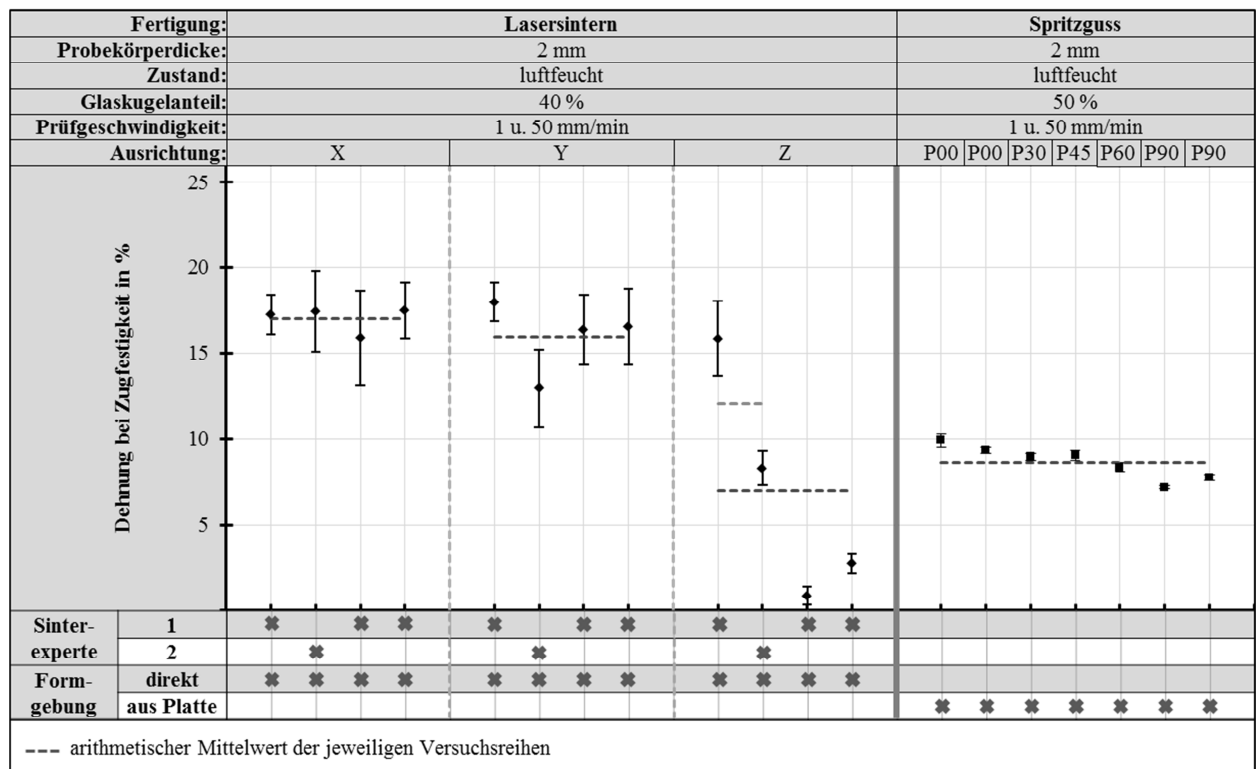


Abbildung 7.9: Dehnung bei Zugfestigkeit von lasergesintertem PA 12 GK 40 und spritzgegossenem PA 12 GK 50 im direkten Vergleich; gemessen an 2 mm dicken Probestäben

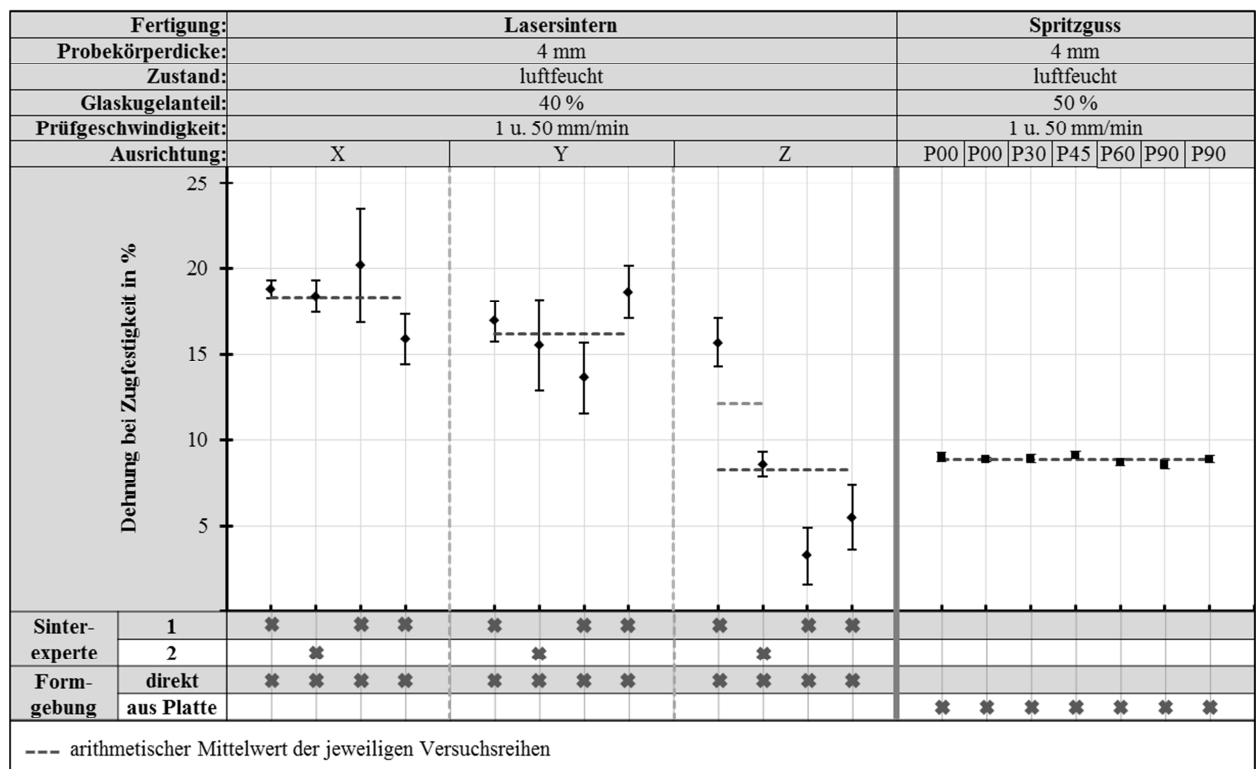


Abbildung 7.10: Dehnung bei Zugfestigkeit von lasergesintertem PA 12 GK 40 und spritzgegossenem PA 12 GK 50 im direkten Vergleich; gemessen an 4 mm dicken Probestäben

Der prozentuale Unterschied zwischen der Dehnung bei Zugfestigkeit der Sinterproben und der Dehnung der Spritzgussproben ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Die Auswertung zeigt, dass die Dehnung bei Zugfestigkeit der spritzgegossenen Probestäbe aus PA 12 GK in Abhängigkeit von der Ausrichtung der Sinterproben um mindestens 27 % kleiner ist als die der Sinterproben.



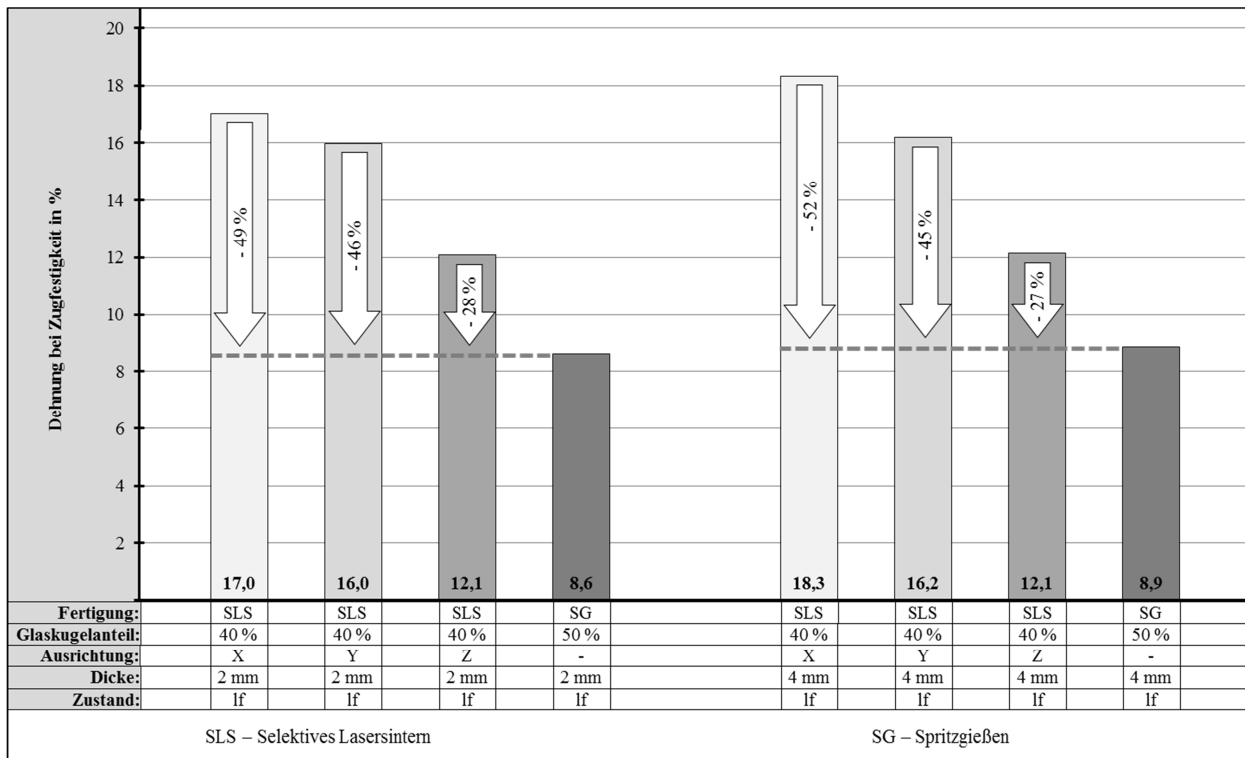


Abbildung 7.11: Prozentualer Unterschied zwischen der Dehnung bei Zugfestigkeit der Sinterproben aus PA 12 GK 40 und der Dehnung bei Zugfestigkeit der Spritzgussproben aus PA 12 GK 50

#### 7.1.4 Bewertung des quantitativen Zusammenhangs im Zugversuch

Die Auswertung des quantitativen Zusammenhangs zwischen den Kennwerten E-Modul, Zugfestigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit zeigt, wie wichtig eine grundlegende Charakterisierung des Materialverhaltens ist und dass ein derartiger Zusammenhang immer nur für eine Materialpaarung und einen Konditionierungszustand gilt. Einzig durch eine sorgfältige Materialcharakterisierung ist es möglich, die quantitativen Unterschiede richtig zu bewerten und die Ursache für die zum Teil sehr großen Abweichungen ausfindig zu machen. Die gesonderte Untersuchung des Einflusses der Wasseraufnahme (siehe Abschnitt 5.3) zeigt beispielsweise, dass die mechanischen Eigenschaften des glaskugelgefüllten Sinterwerkstoffs wesentlich stärker durch Feuchtigkeitsaufnahme beeinflusst werden als die des gefüllten Spritzgusspolyamids, was die hohen Unterschiede von E-Modul und Zugfestigkeit erklärt. Auch die höhere Dehnung bei Zugfestigkeit des Sintermaterials ist auf die starke Beeinflussung des glaskugelgefüllten Sinterpolyamids durch Wasseraufnahme zurückzuführen. Auf der Grundlage der in der Literatur verfügbaren Ergebnisse für den Vergleich der mechanischen Eigenschaften von ungefülltem Sinter- und Spritzgusspolyamid ist eine geringere Dehnung bei Zugfestigkeit beim Sintermaterial zu erwarten. Dies ist bei den untersuchten Werkstoffen mit Glaskugelfüllung jedoch nicht zutreffend. Ohne die vorangegangene Materialcharakterisierung (siehe Kapitel 5) wäre dieses, von dem in der Literatur beschriebenen Verhalten von ungefüllten Proben abweichende, Ergebnis nicht zu erklären.

Anhand der Ergebnisse der Untersuchung des Zusammenhangs im Zugversuch wird deutlich, dass eine quantitative Absicherung von Bauteilkonzepten für Spritzgießbauteile aus PA 12 GK 50 durch Prototypversuche an lasergesinterten Prototypen aus PA 12 GK 40 ohne die Berücksichtigung von Faktoren nicht möglich sein wird, da das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der beiden Materialien sehr unterschiedlich ist. Deshalb wird der quantitative Zusammenhang der mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten

und spritzgegossenen Bauteilen in Abschnitt 7.2 diskutiert und das Vorhandensein eines Faktors, der die quantitative Beurteilbarkeit der Eigenschaften des Spritzgießteils anhand von Prototypversuchen an Lasersinterbauteilen ermöglicht, untersucht.

## 7.2 Quantitativer Zusammenhang im Bauteilversuch

In Kapitel 5 wurde dargestellt, dass die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK von der Ausrichtung im Herstellungsprozess, der Geometrie des Formteils, dem Konditionierungszustand und dem Belastungszustand abhängen. Des Weiteren wurde in Abschnitt 7.1 der quantitative Einfluss des Fertigungsverfahrens auf die mechanischen Kennwerte des Zugversuchs betrachtet. Die genannten Einflussfaktoren müssen sowohl bei der Durchführung von Struktursimulationen (siehe Kapitel 6) als auch bei der Bauteilauslegung berücksichtigt werden. Ob alle Faktoren korrekt berücksichtigt sind und das Bauteil richtig dimensioniert ist, zeigt sich allerdings erst bei der Durchführung von Bauteilversuchen. Dies ist besonders bei Spritzgießbauteilen problematisch, da die Serienbauteile, wie einleitend erläutert, erst nach der Fertigung von teuren Spritzgießwerkzeugen, die nur mit großem Aufwand und in geringem Maße geändert werden können, verfügbar sind. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt analysiert, inwieweit lasergesinterte Prototypen zur quantitativen Absicherung des Bauteilverhaltens von Spritzgießteilen eingesetzt werden können. Nachfolgend wird das Drehmoment-Verdrehwinkel-Verhalten des lasergesinterten Mittelelements direkt mit dem Verhalten des Spritzgießbauteils verglichen und der quantitative Zusammenhang diskutiert.

### 7.2.1 Drehmoment-Verdrehwinkel-Verhalten des Funktionselements

Zur Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs wird sowohl die Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurve des lasergesinterten als auch die des spritzgegossenen Bauteils mithilfe des in Abschnitt 6.5 charakterisierten Prüfstands ermittelt. Die Geometrie des Sinterteils entspricht der des Spritzgießbauteils (siehe Abbildung 7.12).

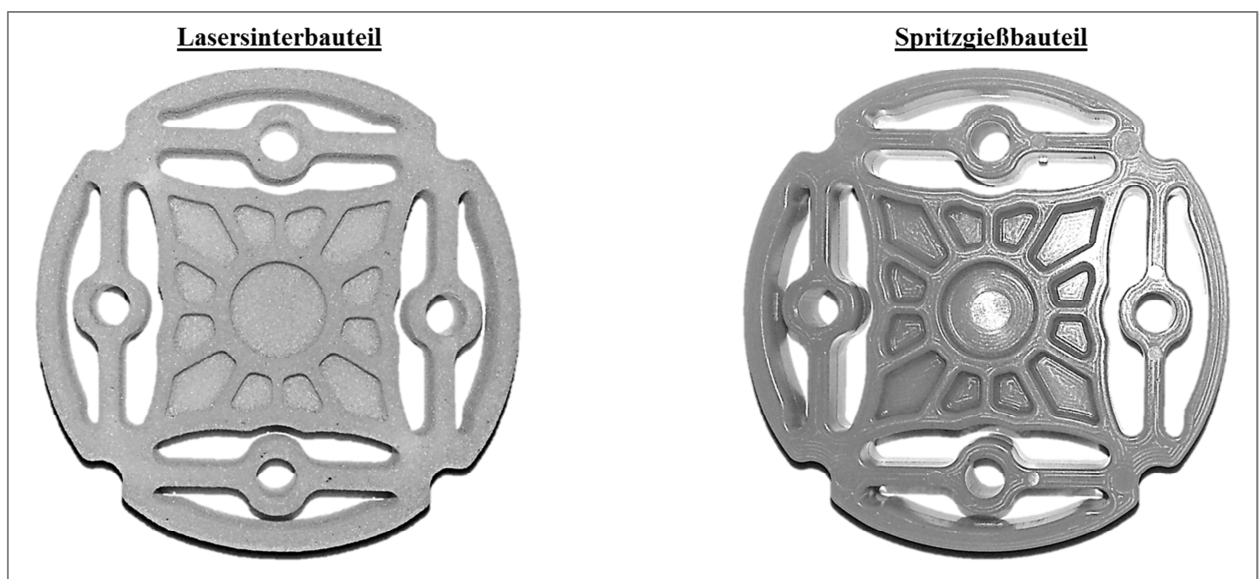


Abbildung 7.12: Lasersinter- und Spritzgießbauteil

Sowohl die Radien an den Außenkanten als auch die Entformungsschrägen werden beim Sinterteil berücksichtigt. Die Verwendung von geometrisch gleichen Teilen und einheitlichen Randbedingungen ist

die Voraussetzung für die direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Torsionssteifigkeitsversuche. Die Lasersinterbauteile werden im Fertigungsprozess flach in XY-Ebene positioniert (siehe Bild a) der Abbildung 6.12). Die Ausrichtung des Spritzgießbauteils im Spritzgießwerkzeug ist in Abbildung 10.6 im Anhang dargestellt. Abbildung 7.13 zeigt die Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven der im luftfeuchten Zustand untersuchten Lasersinter- und Spritzgießbauteile im direkten Vergleich. Trotz der gleichen Bauteilgeometrie weicht das Verhalten der spritzgegossenen Bauteile deutlich von dem Verhalten der Lasergesinterten ab. Sowohl die Drehmomentbelastbarkeit als auch der Verdrehwinkel beim Bruch der Spritzgießbauteile sind größer als die jeweiligen Werte der Sinterteile.

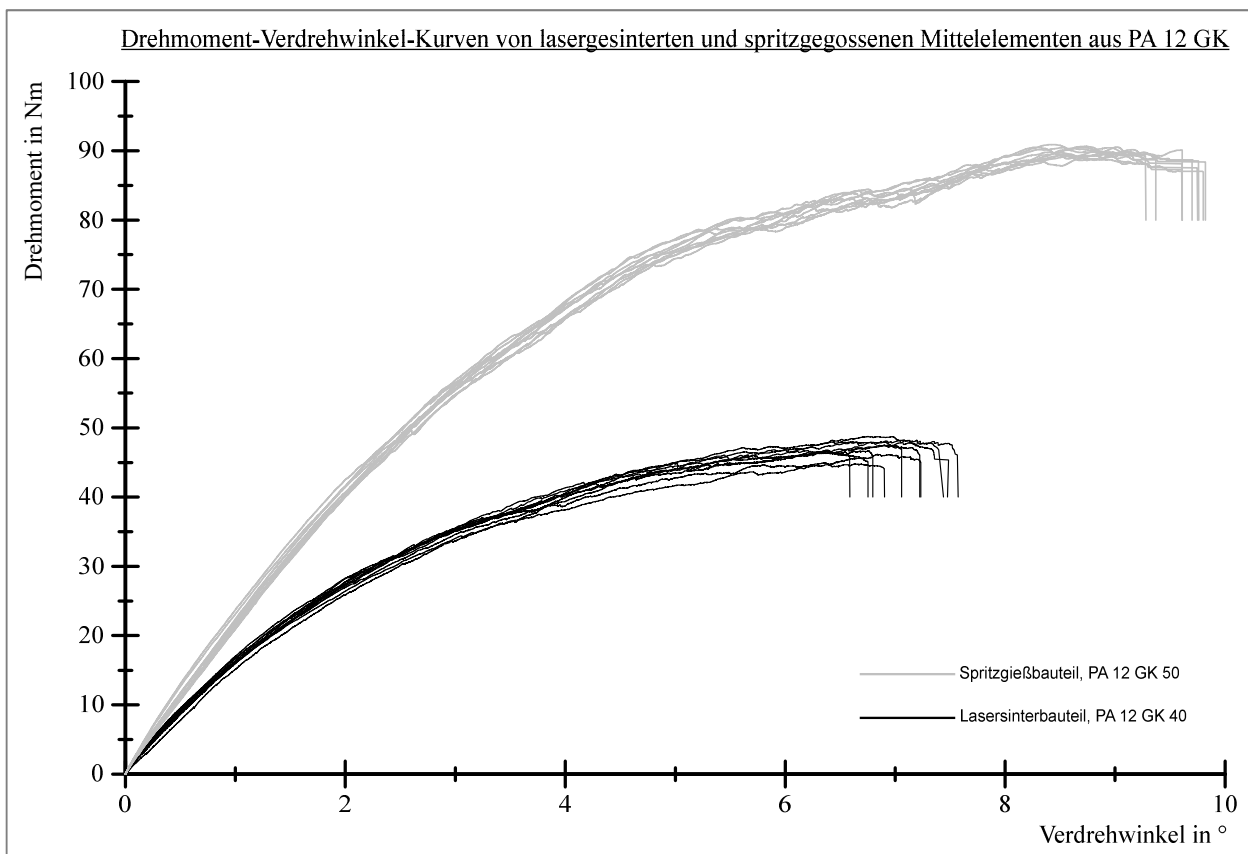


Abbildung 7.13: Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven von lasergesinterten Prototypen aus PA 12 GK 40 und spritzgegossenen Bauteilen aus PA 12 GK 50

### 7.2.2 Quantitativer Zusammenhang Bruchdrehmoment

Der direkte Vergleich des Bruchdrehmoments aus zehn Bauteilversuchen zeigt den erheblichen Unterschied in der Drehmomentbelastbarkeit des lasergesinterten und des spritzgegossenen Mittelelements (siehe Abbildung 7.14). Beim lasergesinterten Prototyp führt eine äußere Torsionsbelastung von 47,1 Nm im Kurzzeitversuch zum Bauteilversagen (siehe Abbildung 7.14). Prozentual gesehen ist der arithmetische Mittelwert des Bruchdrehmoments der Spritzgießteile um 91 % größer als das der Lasersinterteile.



Nennspannung angegeben und als Maximalspannung, die ein Probekörper während des Zugversuchs ertragen kann, definiert [116]. Aus der Nennzugfestigkeit kann gemäß Gleichung (6.2) auf Seite 145 direkt die dazugehörige Maximalkraft im Zugversuch berechnet werden, wenn die Anfangsquerschnittsfläche des Probestabs bekannt ist. Der quantitative Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit zweier Werkstoffe beschreibt demnach den gesuchten Zusammenhang zwischen zwei äußeren Belastungszuständen, die zum Versagen unter kurzzeitiger Belastung führen. Der Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit der betrachteten Werkstoffe wurde bereits in Unterabschnitt 7.1.2 ermittelt. Der direkte Vergleich der prozentualen Veränderung der Zugfestigkeit ( $\sigma_M$ ) und der im Bauteilversuch ermittelten Veränderung des Bruchdrehmoments ( $M_B$ ) des Ausgleichselements ist in Tabelle 7.2 für Probestäbe und Bauteile aus lasergesintertem PA 12 GK 40 und spritzgegossenem PA 12 GK 50 dargestellt.

Tabelle 7.2: Direkter Vergleich der prozentualen Veränderung von Zugfestigkeit und Bruchdrehmoment

	Fertigungs- verfahren	Material- bez.	Kenn- wert	Dicke in mm	Aus- richtung	Kennwert luftfeucht	Dicke in mm	Aus- richtung	Kennwert luftfeucht	Bemerkung
Werkstoffprüfung	SLS	PA 12 GK 40	$\sigma_M$	2	X	24,3 MPa	4	X	25,3 MPa	Werte gemäß Unterabschnitt 7.1.2
					Y	23,8 MPa		Y	24,6 MPa	
					MW XY-Ebene	24,1 MPa		MW XY-Ebene	25,0 MPa	
	SG	PA 12 GK 50	$\sigma_M$	2	-	48,1 MPa	4	-	48,7 MPa	isotroper MW gemäß Unterabschnitt 7.1.2
	Prozentualer Unterschied $\sigma_M$			2	X	+ 98 %	4	X	+ 92 %	Sinterproben als Bezugsgröße
					Y	+ 102 %		Y	+ 98 %	
					MW XY-Ebene	+ 100 %		MW XY-Ebene	+ 95 %	
Bauteilversuch	SLS	PA 12 GK 40	$\sigma_M$	2	XY45	23,8 MPa	4	XY45	24,6 MPa	Proben u. Prototypen aus d. selben Charge
	SG	PA 12 GK 50	$\sigma_M$	2	P00	46,9 MPa	4	P00	48,7 MPa	Proben u. Prototypen aus d. selben Materialcharge
	Prozentualer Unterschied $\sigma_M$			2	-	+ 97 %	4	-	+ 98 %	Sinterproben als Bezugsgröße
	Fertigungs- verfahren	Material- bez.	Kenn- wert	Dicke in mm	Aus- richtung	Kennwert luftfeucht	Bemerkung			
Bauteilversuch	SLS	PA 12 GK 40	$M_B$	2,5-3	XY	47,1 Nm	Wandstärke der höchstbelasteten Bauteilstrukturen			
	SG	PA 12 GK 50	$M_B$	2,5-3	-	90,1 Nm	Wandstärke der höchstbelasteten Bauteilstrukturen			
	Prozentualer Unterschied $M_B$			2,5-3	-	+ 91 %	Sinterprototyp als Bezugsgröße			

SLS - Lasersintern

 $\sigma_M$  - Zugfestigkeit

SG - Spritzgießen

 $M_B$  - Bruchdrehmoment

MW - Mittelwert

Die systematische Analyse der ermittelten Versuchsergebnisse zeigt, dass der Zusammenhang zwischen äußeren Belastungen, die zum Versagen im einachsigen Zugversuch und im Bauteilversuch führen, vergleichbar ist. Der prozentuale Unterschied zwischen der Zugfestigkeit des Sintermaterials und der Festigkeit des Spritzgussmaterials liegt zwischen + 92 und + 102 % und ist damit nur geringfügig größer als der Unterschied der Bruchdrehmomente. Demnach kann durch Bauteilversuche an lasergesinterten Prototypen ein quantitativer Zusammenhang zwischen der Belastbarkeit des Prototyps und des Spritzgießbauteils hergestellt werden, wenn die Zugfestigkeit des Sinterwerkstoffs und die des Spritzgießmaterials bekannt

ist. Um die Abweichungen zu minimieren, sollte die Zugfestigkeit der zu vergleichenden Werkstoffe an Probestäben gemessen werden, die in der gleichen Charge gefertigt wurden wie die Bauteile. Dies gilt insbesondere für die Festigkeit des Sintermaterials, da die Charakterisierung des Einflusses der Charge in Abschnitt 5.6 zeigt, dass die mechanischen Eigenschaften des Sintermaterials wesentlich stärker streuen als die des Spritzgussmaterials.

Die Zugfestigkeit der spritzgegossenen Probestäbe, die aus der gleichen Materialcharge hergestellt wurden wie die Spritzgießbauteile ist bei den 2 mm dicken Probestäben um 97 % größer als die Zugfestigkeit der Sinterproben, die im gleichen Baujob gesintert wurden wie die Prototypen. Bei den 4 mm dicken Proben liegt die Veränderung bei + 98 % (siehe Tabelle 7.2). Wird das ermittelte Verhältnis der Zugfestigkeiten genutzt, um anhand des Bruchdrehmoments der lasergesinterten Prototypen die Drehmomentbelastbarkeit des Spritzgießbauteils zu berechnen, dann ergibt sich ein Bruchdrehmoment von 92,8 bzw. 93,3 Nm. Verglichen mit dem im Bauteilversuch ermittelten Bruchdrehmoment des Spritzgießteils liegt die Abweichung bei lediglich 3 bzw. 3,5 % (siehe Tabelle 7.3).

Tabelle 7.3: Berechnetes und gemessenes Bruchdrehmoment des Spritzgießbauteils im direkten Vergleich

Gemessenes Bruchdrehmoment des Sinterteils (PA 12 GK 40)			M <sub>B_LS_gemessen</sub>	47,1 Nm
Berechnetes Bruchdrehmoment des Spritzgießteils (PA 12 GK 50)	Faktor	1,97	M <sub>B_SG_berechnet_min</sub>	92,8 Nm
		1,98	M <sub>B_SG_berechnet_max</sub>	93,3 Nm
	Mittelwert		M <sub>B_SG_berechnet_MW</sub>	93,1 Nm
	Gemessenes Bruchdrehmoment des Spritzgießteils (PA 12 GK 50)			M <sub>B_SG_gemessen</sub>
Prozentualer Unterschied zwischen gemessenem und berechnetem Bruchdrehmoment			Δ <sub>MB_min</sub>	3,0 %
			Δ <sub>MB_max</sub>	3,5 %

Diese systematische Untersuchung zeigt, dass der quantitative Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit des Sintermaterials und der Festigkeit des Spritzgießmaterials genutzt werden kann, um die Belastbarkeit des späteren Spritzgießbauteils frühzeitig im Entwicklungsprozess durch Versuche an lasergesinterten Prototypen zu verifizieren. Diese schnelle und kostengünstige Möglichkeit zur Absicherung von Bauteilkonzepten erhöht die Sicherheit im Entwicklungsprozess und ermöglicht das frühzeitige und endgültige Treffen von wichtigen Entscheidungen. Die Gültigkeit des zuvor ermittelten Zusammenhangs zwischen der Zugfestigkeit von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben und der quantitativen Belastbarkeit eines realen Bauteils wird nachfolgend mithilfe eines anderen Spritzgießmaterials verifiziert.

### 7.2.3 Verifikation des quantitativen Zusammenhangs des Bruchdrehmoments

Zur Verifikation des ermittelten Zusammenhangs hinsichtlich der Bauteilbelastbarkeit wird das Mittелеlement der Ausgleichskupplung aus glaskugelgefülltem PA 12 mit einem Glaskugelgewichtsanteil von 30 % hergestellt. Die mechanischen Eigenschaften dieses Materials wurden ebenfalls in Kapitel 5 grundlegend charakterisiert. Abbildung 7.15 zeigt den prozentualen Unterschied zwischen der Zugfestigkeit des Sintermaterials und der Festigkeit des Spritzgusspolyamids PA 12 GK 30. Dargestellt ist jeweils die gemittelte Zugfestigkeit aus verschiedenen Versuchsreihen. Die Einzelergebnisse der Versuchsreihen sind in Abbildung 10.7 und Abbildung 10.8 im Anhang dargestellt. Für jede Versuchsreihe wurden sechs Zug-

versuche durchgeführt. Der direkte Vergleich zeigt, dass die Zugfestigkeit der spritzgegossenen Probestäbe um mindestens 71 % größer ist als die der lasergesinterten Zugstäbe.

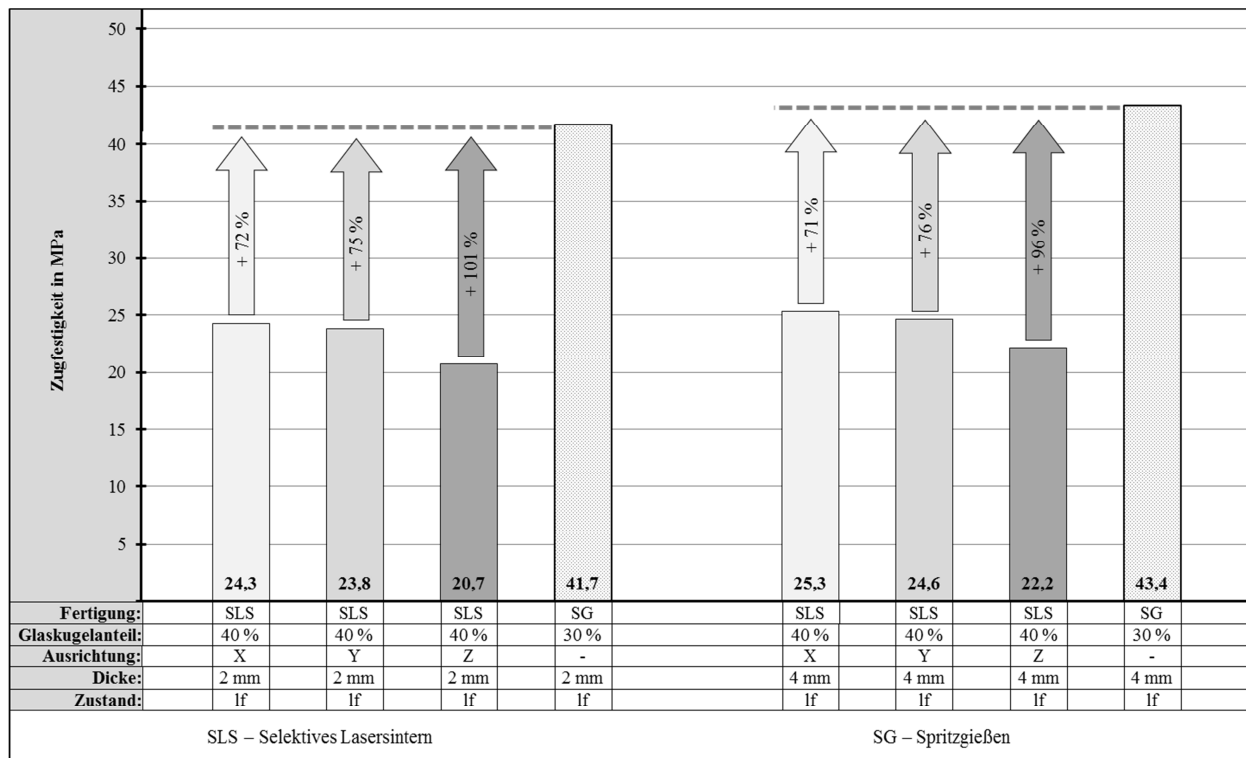


Abbildung 7.15: Prozentualer Unterschied zwischen der Zugfestigkeit von Sinterproben aus PA 12 GK 40 und der Festigkeit von spritzgegossenen Proben aus PA 12 GK 50

Zusätzlich zu der Auswertung aller durchgeführten Versuchsreihen in Abbildung 7.15 zeigt Tabelle 7.4 den prozentualen Unterschied zwischen der Zugfestigkeit von lasergesinterten XY-Proben und spritzgegossenen P00-Probestäben, die im selben Baujob bzw. aus derselben Materialcharge hergestellt wurden wie die untersuchten Bauteile. Anhand dieses Zusammenhangs wird nachfolgend das Bruchdrehmoment der Spritzgießbauteile vorausbestimmt.

Tabelle 7.4: Prozentualer Unterschied zwischen der Zugfestigkeit von lasergesinterten XY-Proben aus PA 12 GK 40 und spritzgegossenen P00-Proben aus PA 12 GK 30

	Fertigungs- verfahren	Material- bez.	Kenn- wert	Dicke in mm	Aus- richtung	Kennwert luftfeucht	Dicke in mm	Aus- richtung	Kennwert luftfeucht	Bemerkung
Werkstoffprüfung	SLS	PA 12 GK 40	$\sigma_M$	2	XY45	23,78 MPa	4	XY45	24,63 MPa	Proben u. Prototypen aus d. selben Charge
	SG	PA 12 GK 30	$\sigma_M$	2	P00	41,92 MPa	4	P00	43,13 MPa	Proben u. Prototypen aus d. selben Materialcharge
	Prozentualer Unterschied $\sigma_M$			2	-	+ 76 %	4	-	+ 75 %	Sinterproben als Bezugsgröße

SLS - Lasersintern

$\sigma_M$  - Zugfestigkeit

SG - Spritzgießen

Der arithmetische Mittelwert der Zugfestigkeit der spritzgegossenen Probestäbe aus PA 12 GK 30 ist um 76 bzw. 75 % größer als die Festigkeit der lasergesinterten Probestäbe. Der Unterschied zwischen der Festigkeit dieser beiden Materialien ist damit um ca. 20 % geringer als bei der in Unterabschnitt 7.2.2 diskutierten Materialpaarung. Aufgrund des ermittelten quantitativen Zusammenhangs ist davon auszugehen, dass der prozentuale Unterschied zwischen dem Bruchdrehmoment des lasergesinterten und des

spritzgegossenen Mittelelements ebenfalls bei ca. 75 % liegt. Das vorausberechnete Bruchdrehmoment der Spritzgießbauteile liegt somit bei ca. 82,7 Nm (siehe Tabelle 7.5). Der im Bauteilversuch bestimmte arithmetische Mittelwert des Bruchdrehmoments der Spritzgießbauteile liegt bei 81,0 Nm. Daraus resultiert ein prozentualer Unterschied zwischen dem Bruchdrehmoment des lasergesinterten und des spritzgegossenen Mittelelements von 72 % (siehe Abbildung 7.16).

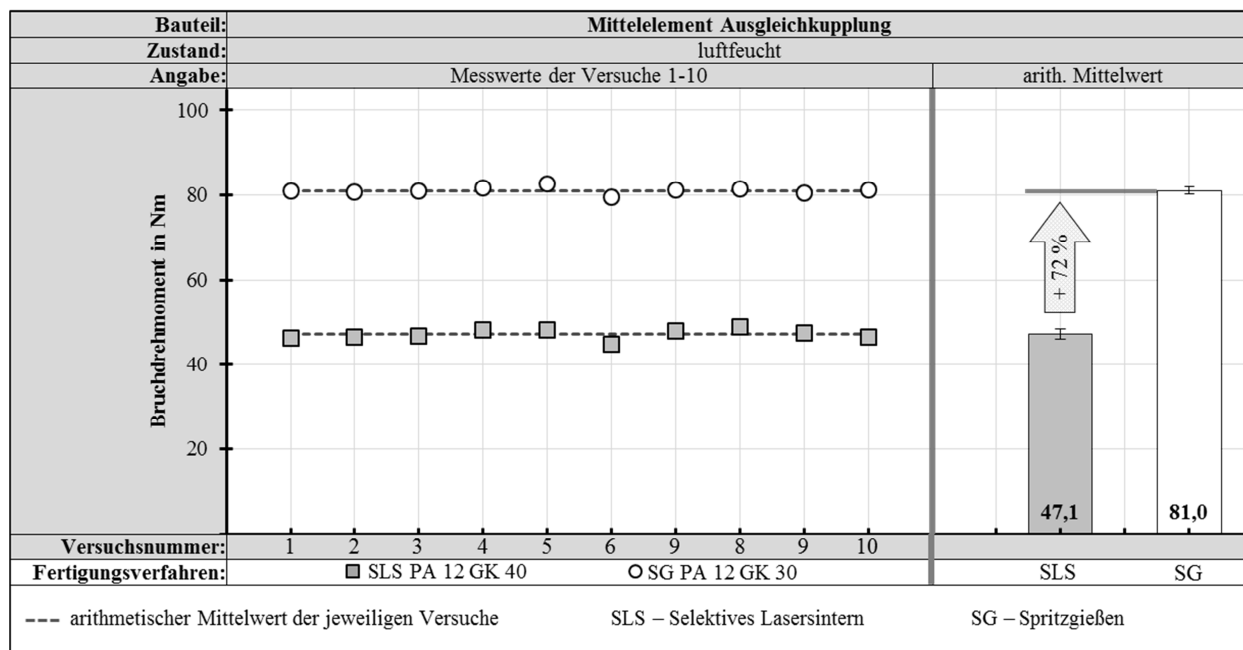


Abbildung 7.16: Bruchdrehmoment des lasergesinterten Mittelelements aus PA 12 GK 40 und des spritzgegossenen Bauteils aus PA 12 GK 30 im direkten Vergleich

Der direkte Vergleich des vorausberechneten und des im Versuch ermittelten Bruchdrehmoments in Tabelle 7.5 zeigt, dass die Abweichung zwischen den beiden Werten im niedrigen einstelligen Prozentbereich liegt. Dieses Ergebnis bestätigt, dass der quantitative Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit des Prototypmaterials und der Festigkeit des Spritzgießmaterials genutzt werden kann, um die Belastbarkeit des späteren Spritzgießbauteils mithilfe von Bauteilversuchen an lasergesinterten Prototypen im Voraus zu bestimmen.

Tabelle 7.5: Berechnetes Bruchdrehmoment des spritzgegossenen Mittelelements aus PA 12 GK 30

Gemessenes Bruchdrehmoment des Sinterteils (PA 12 GK 40)			M <sub>B_LS_gemessen</sub>	47,1 Nm
Berechnetes Bruchdrehmoment des Spritzgießteils (PA 12 GK 30)	Faktor	1,75	M <sub>B_SG_berechnet_min</sub>	82,4 Nm
		1,76	M <sub>B_SG_berechnet_max</sub>	82,9 Nm
	Mittelwert		M <sub>B_SG_berechnet_MW</sub>	82,7 Nm
Gemessenes Bruchdrehmoment des Spritzgießteils (PA 12 GK 30)			M <sub>B_SG_gemessen</sub>	81,0 Nm
Prozentualer Unterschied zwischen gemessenem und berechnetem Bruchdrehmoment			Δ <sub>MB_min</sub>	1,8 %
			Δ <sub>MB_max</sub>	2,3 %

Die Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven des lasergesinterten Prototyps aus PA 12 GK 40 und des spritzgegossenen Mittelelements aus PA 12 GK 30 sind in Abbildung 7.17 dargestellt. Der ermittelte Zusammenhang zeigt, dass trotz des unterschiedlichen Kurvenverlaufs anhand des Bruchdrehmoments der Lasersinterbauteile die Belastbarkeit des Spritzgießbauteils in sehr guter Näherung vorausbestimmt werden



kann. Abbildung 10.9 im Anhang zeigt zusätzlich die Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven der Mittelelemente aus den drei in Unterabschnitt 7.2.2 und 7.2.3 betrachteten Materialien im direkten Vergleich.

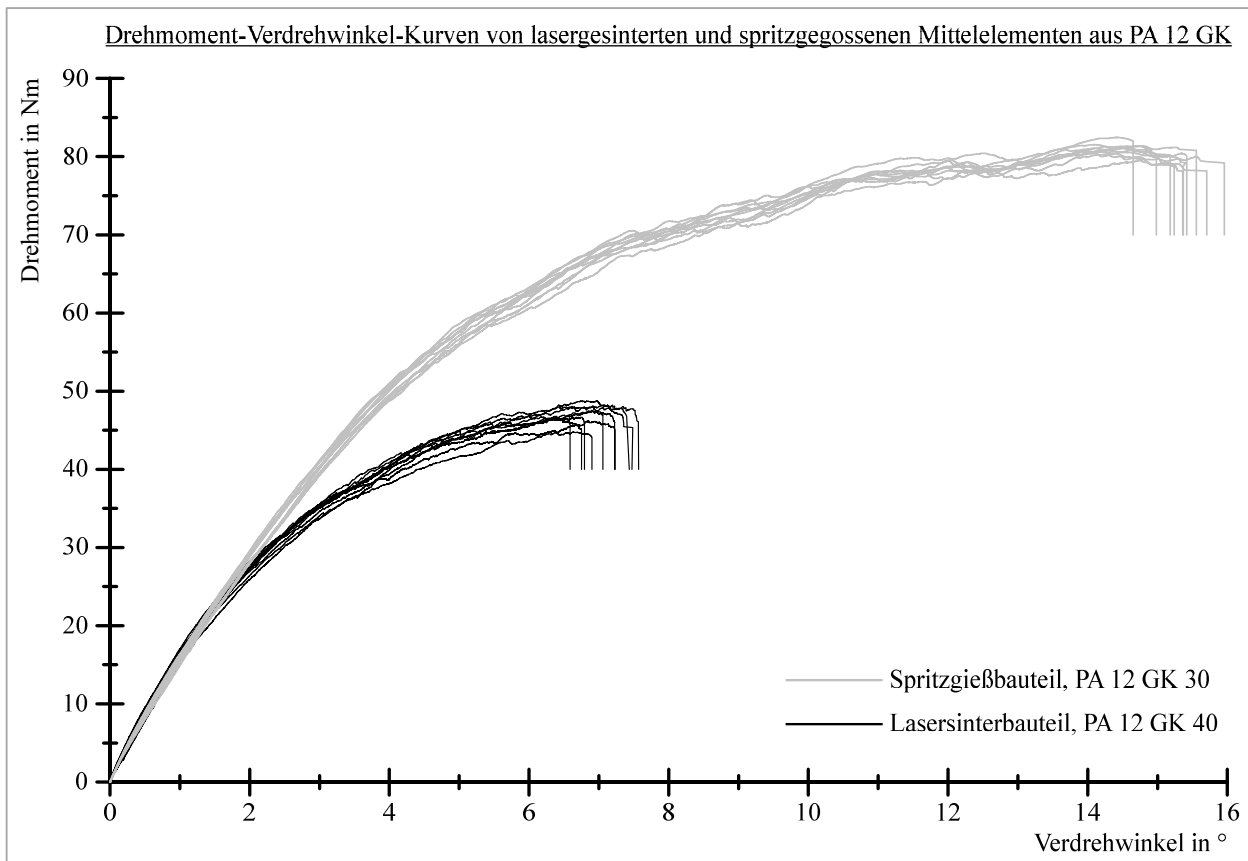


Abbildung 7.17: Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven von lasergesinterten Prototypen aus PA 12 GK 40 und spritzgegossenen Bauteilen aus PA 12 GK 30

#### 7.2.4 Quantitativer Zusammenhang Bauteilsteifigkeit

Die Bauteilsteifigkeit wird in Regel gleichzeitig von der Werkstoffauswahl, der Bauteilgeometrie und der Verarbeitung beeinflusst. Darüber hinaus hängen die Steifigkeitskennwerte verschiedener Werkstoffe in unterschiedlicher Weise von der Höhe der Beanspruchung ab [9]. Die Abhängigkeit der Werkstoffsteifigkeit von der Beanspruchungshöhe wird durch die Spannungs-Dehnungs-Kurve beschrieben. Abbildung 7.18 zeigt, dass die Steifigkeit des Sintermaterials PA 12 GK 40 und die des Spritzgießmaterials PA 12 GK 50 unterschiedlich stark durch die Beanspruchungshöhe beeinflusst werden. Abbildung 10.10 im Anhang veranschaulicht zusätzlich die Abhängigkeit der Steifigkeit von der Beanspruchungshöhe für das Spritzgießmaterial PA 12 GK 30.

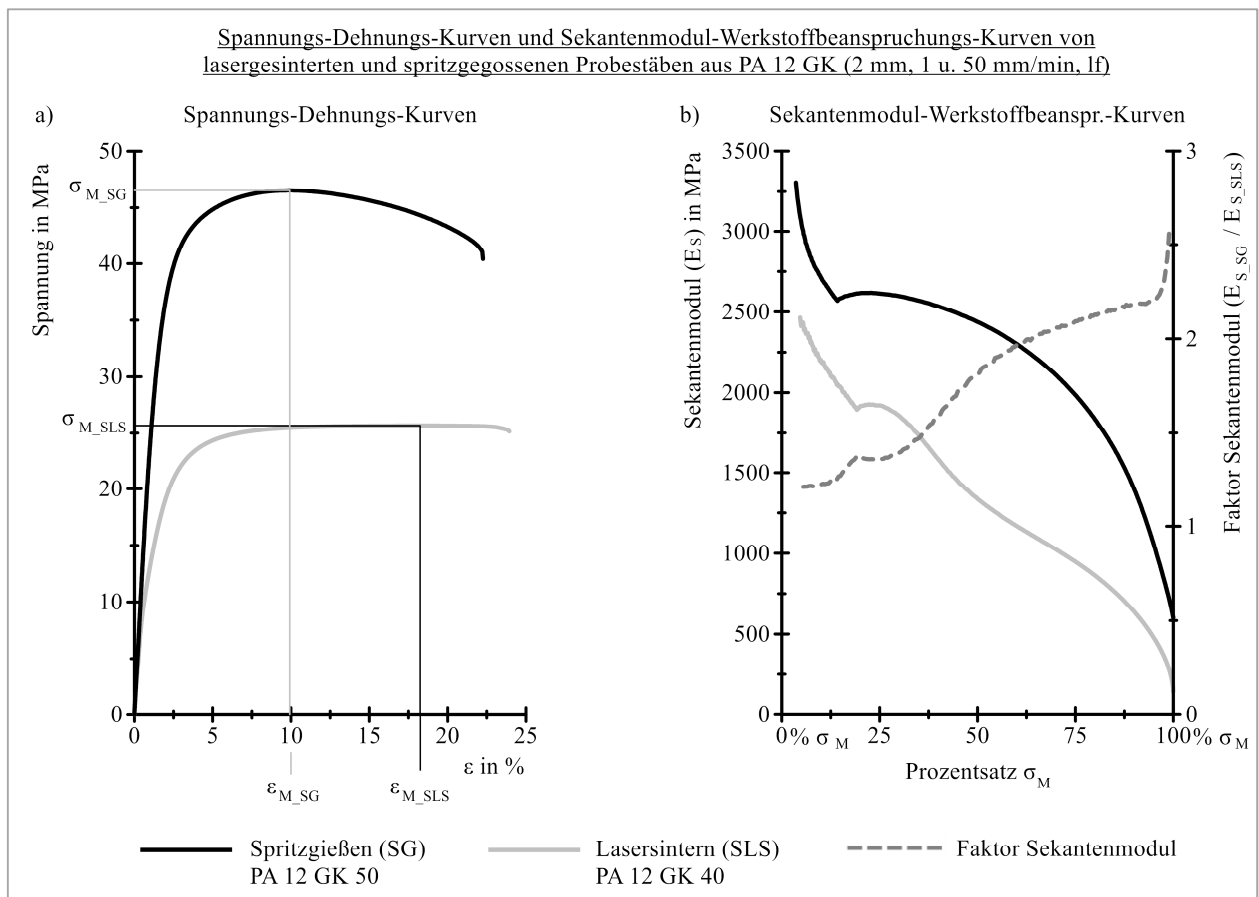


Abbildung 7.18: Spannungs-Dehnungs-Kurven und Sekantenmodul-Werkstoffbeanspruchungs-Kurven von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben aus PA 12 GK

Im Diagramm a) der Abbildung 7.18 sind zwei Spannungs-Dehnungs-Kurven der betrachteten Werkstoffe dargestellt. Für die Bauteildimensionierung ist das Kraft-Verformungs-Verhalten des Werkstoffs bis zum Erreichen der Zugfestigkeit besonders interessant. Für diesen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve ist die Abhängigkeit des Ursprungs-Sekantenmoduls ( $E_S$ ) von der Spannungshöhe im Diagramm b) der Abbildung 7.18 dargestellt. Anhand der Kurvenverläufe ist deutlich zu erkennen, dass der Sekantenmodul beider Werkstoffe mit steigender Beanspruchung stark abfällt. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass der Ursprungs-Sekantenmodul der Materialien in unterschiedlicher Weise durch die Spannungshöhe beeinflusst wird. Daraus resultiert, dass der Faktor ( $E_{S\_SG}/E_{S\_LS}$ ) zwischen den Ursprungs-Sekantenmoduln nicht konstant ist, sondern ebenfalls von der Höhe der Belastung abhängt. Der Knick im Kurvenverlauf des Sekantenmoduls resultiert aus der Umschaltung der Prüfgeschwindigkeit nach der Ermittlung des E-Moduls. Der steil abfallende Kurventeil liegt zwischen 0,05 und 0,25 % technischer Dehnung. In diesem Bereich wird der Elastizitätsmodul mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min ermittelt. Nach der Bestimmung des E-Moduls wird die Prüfgeschwindigkeit während der Prüfung automatisch auf 50 mm/min erhöht (siehe Unterabschnitt 4.5.4). Der quantitative Zusammenhang zwischen den Zug-E-Moduln der betrachteten Werkstoffe (siehe Unterabschnitt 7.1.1) gilt lediglich für die Steigung der Sekante zwischen 0,05 und 0,25 % technischer Dehnung und kann nicht auf andere Bereiche der Spannungs-Dehnungs-Kurve übertragen werden.

Externe Belastungen, die auf ein Bauteil einwirken, führen im Inneren eines Bauteils zu mehrachsigen Spannungszuständen. Die Höhe der daraus resultierenden lokalen Werkstoffbeanspruchung variiert in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie. Aufgrund der Abhängigkeit der Werkstoffsteifigkeit von der Höhe der Beanspruchung hängt die lokale Bauteilsteifigkeit ebenfalls von der Höhe der lokal vorhande-

nen Werkstoffbeanspruchung ab. Diagramm a) der Abbildung 7.19 zeigt die Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven des lasergesinterten und des spritzgegossenen Mittelelements der Ausgleichskupplung. Dargestellt ist jeweils die aus zehn Einzelversuchen (siehe Unterabschnitt 7.2.1) gemittelte Kurve. Im Diagramm b) der Abbildung 7.19 ist die Abhängigkeit der Torsionssteifigkeit ( $C_T$ ) des Mittelelements von der Belastungshöhe dargestellt. Sowohl die Steifigkeit des Sinterteils aus PA 12 GK 40 als auch die des Spritzgießbauteils als PA 12 GK 50 sinkt mit größer werdender Drehmomentbelastung. Zusätzlich ist im Diagramm b) der Faktor ( $C_{T\_SG}/C_{T\_LS}$ ) zwischen der Torsionssteifigkeit des Spritzgießteils und der Steifigkeit des Prototyps dargestellt. Der Kurvenverlauf zeigt, dass auch der Torsionssteifigkeitsfaktor von der Höhe der Drehmomentbelastung abhängt. Allerdings hat der Torsionssteifigkeitsfaktor einen anderen Kurvenverlauf als der aus den Ergebnissen des Zugversuchs ermittelte Sekantenmodulfaktor (Vergleich Diagramm b) der Abbildung 7.19 und Diagramm b) der Abbildung 7.18). Abbildung 10.11 im Anhang zeigt außerdem die Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurve und die Torsionssteifigkeits-Bauteilbelastungs-Kurven des Mittelelements aus PA 12 GK 30. Auch der Kurvenverlauf des Torsionssteifigkeitsfaktors dieses Mittelelements aus PA 12 GK 30 hat einen anderen Verlauf als der entsprechende Sekantenmodulfaktor (Vergleich Diagramm b) der Abbildung 10.11 und Diagramm b) der Abbildung 10.10).

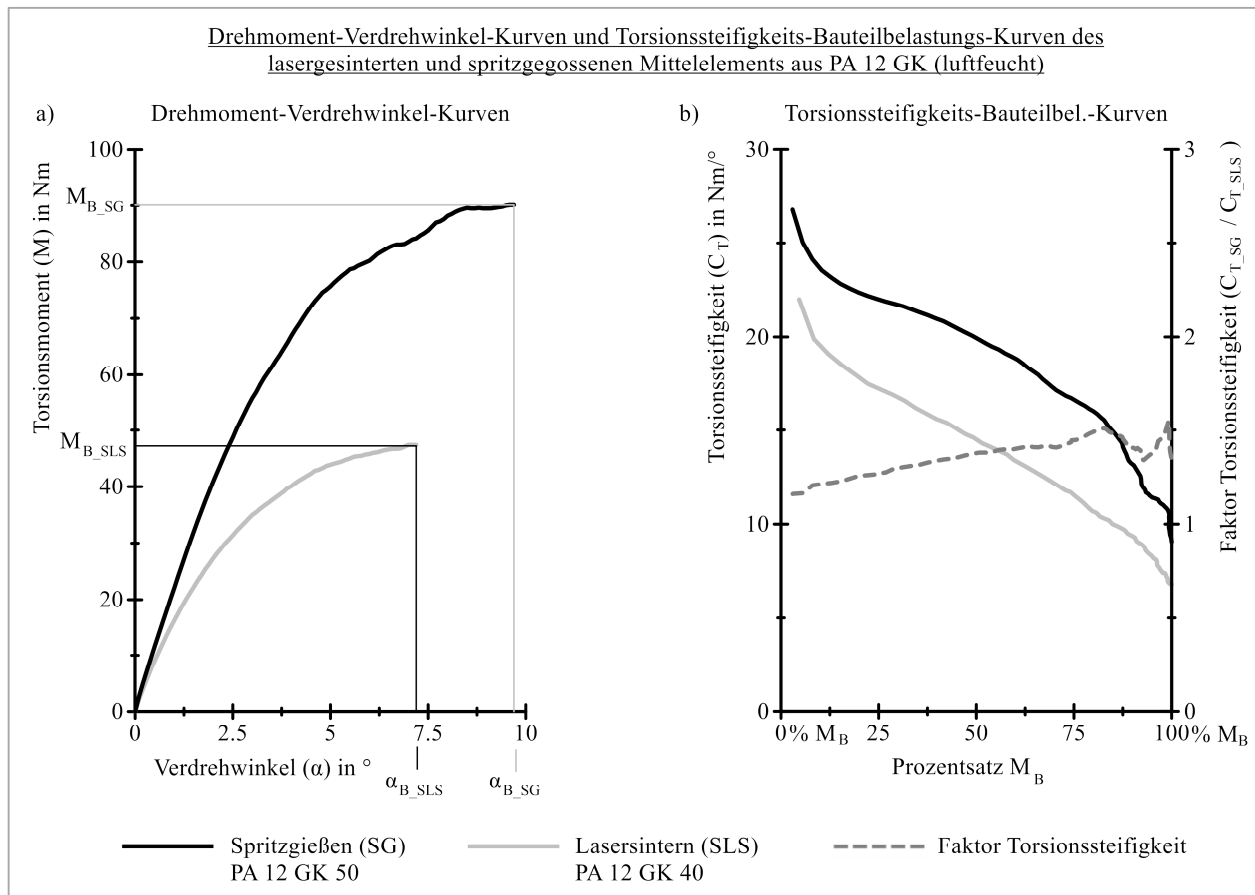


Abbildung 7.19: Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven und Torsionssteifigkeits-Bauteilbelastungs-Kurven des lasergesinterten und spritzgegossenen Mittelelements aus PA 12 GK

Die Abhängigkeit der Steifigkeitskennwerte von der Höhe der Beanspruchung in Kombination mit den lokal variierenden Spannungszuständen im Inneren eines Bauteils führen dazu, dass die Kraft-Verformungs-Kurve des Sinterprototyps nicht mithilfe eines Faktors, der aus den Spannungs-Dehnungs-Kurven des Spritzgieß- und des Sintermaterials ermittelt wird, in die Kraft-Verformungs-Kurve des Spritzgießteils überführt werden kann. Dies gilt sowohl für den quantitativen Zusammenhang zwischen

der Bauteilsteifigkeit des Sinterprototyps aus PA 12 GK 40 und des spritzgegossenen Mittelelements aus PA 12 GK 50 als auch für den Zusammenhang zwischen Sinterprototyp und spritzgegossenem Mittelelement aus PA 12 GK 30.

### 7.2.5 Bewertung des quantitativen Zusammenhangs im Bauteilversuch

Eine direkte Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen an lasergesinterte Prototypen ist bei den betrachteten Werkstoffen ohne die Berücksichtigung von Faktoren nicht möglich, da das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der beiden Materialien sehr unterschiedlich ist (siehe Abschnitt 7.1). Dennoch zeigt die Analyse des quantitativen Zusammenhangs des Bruchdrehmoments, dass sich das Bruchdrehmoment des späteren Spritzgießbauteils mithilfe eines konstanten Faktors, der aus den Zugfestigkeiten der betrachteten Materialien ermittelt werden kann, mit sehr guter Übereinstimmung aus der Belastbarkeit des lasergesinterten Prototyps berechnen lässt. Wichtig für die Anwendung des beschriebenen Zusammenhangs ist, dass sowohl die Probestäbe zur Ermittlung des Umrechnungsfaktors als auch die lasergesinterten Prototypen zur Ermittlung der Bauteilbelastbarkeit den gleichen Feuchtigkeitsgehalt aufweisen. Der Feuchtigkeitsgehalt muss den Konditionierungszustand des späteren Spritzgießbauteils widerspiegeln. Darüber hinaus sollte der Umrechnungsfaktor aufgrund der in Abschnitt 5.5 diskutierten Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Dicke des Probestabs mithilfe von Probestäben ermittelt werden, die die Wanddicke des realen Bauteils möglichst genau widerspiegeln. Die Analyse des quantitativen Zusammenhangs zwischen der Steifigkeit des Prototyps und der Steifigkeit des Spritzgießbauteils hat allerdings ergeben, dass es nicht möglich ist, aus der Kraft-Verformungs-Kurve des Sinterprototyps die entsprechende Kurve des Spritzgießbauteils abzuleiten. Bereits in Kapitel 6 wurde dargestellt, dass lasergesinterte Prototypen bei der Verwendung des richtigen Materialmodells zur Verifikation von Simulationsergebnissen eingesetzt werden können. Durch Prototypversuche konnte sichergestellt werden, dass das Kraft-Verformungs-Verhalten des betrachteten Bauteils in der Struktursimulation mit den gewählten Randbedingungen korrekt abgebildet wird. Im nachfolgenden Abschnitt wird das Materialmodell der bereits verifizierten Simulation modifiziert, um das Kraft-Verformungs-Verhalten des eigentlichen Spritzgießbauteils zu simulieren.

## 7.3 Quantitative Absicherung durch Struktursimulation

In Kapitel 6 wurde erläutert, dass durch den Einsatz von lasergesinterten Prototypen zur Verifizierung von Simulationsergebnissen sichergestellt werden kann, dass die gewählten Randbedingungen und das verwendete Materialmodell das Verhalten des betrachteten Bauteils korrekt abbilden. Die auf diese Weise verifizierte Simulation wird im Folgenden genutzt, um die Kraft-Verformungs-Kurve des späteren Spritzgießbauteils zu simulieren. Zu diesem Zweck wird lediglich das Materialmodell entsprechend angepasst.

### 7.3.1 Materialmodell

Das Materialverhalten der betrachteten Spritzgussmaterialien wurde in Kapitel 5 grundlegend charakterisiert. Die Untersuchung der Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften in Unterabschnitt 5.2.7 hat ergeben, dass das Verhalten der beiden glaskugelgefüllten Spritzgussmaterialien als isotrop angesehen werden kann. Aus diesem Grund wird zur Simulation des Bauteilverhaltens der spritzgegossenen Mittelelemente das isotrope von Mises-Fließkriterium (siehe Unterabschnitt 6.3.2) verwendet.

Zur Erstellung des Materialmodells werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven von direkt gespritzten Probestäben aus PA 12 GK 30 und PA 12 GK 50 verwendet. Das Material für die Probestäbe stammt jeweils aus der gleichen Materialcharge, mit der auch die Spritzgießbauteile gefertigt werden. Die technischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der Probestäbe aus PA 12 GK 50 sind im Diagramm a) der Abbildung 7.20 dargestellt. Diagramm b) zeigt die wahren Spannungs-Dehnungs-Kurven, die gemäß Unterabschnitt 6.2.3 berechnet wurden. Zusätzlich ist im Diagramm b) die gemittelte Kurve dargestellt, die zur Erstellung des elastisch-plastischen Materialmodells verwendet wird. Die entsprechenden Diagramme für das Spritzgussmaterial mit 30 % Glaskugelhewichtsanteil sind in Abbildung 10.12 im Anhang dieser Arbeit abgebildet.

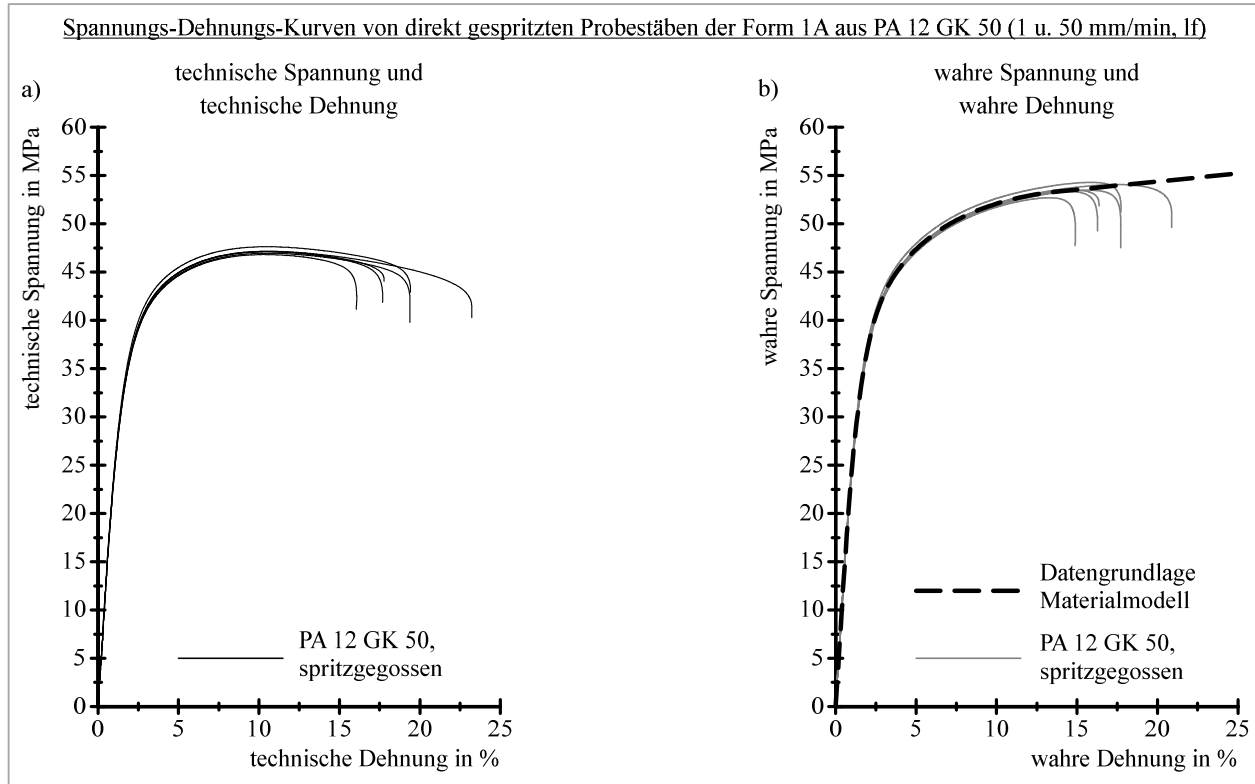


Abbildung 7.20: Datengrundlage zur Erstellung des Materialmodells für das Spritzgussmaterial PA 12 GK 50

### 7.3.2 Simulation des Bauteilverhaltens

Mithilfe der in Kapitel 6 verifizierten Struktursimulation und eines elastisch-plastischen Materialmodells kann dann das Drehmoment-Verdrehwinkel-Verhalten des Spritzgießteils während des Kurzzeit-Torsionssteifigkeitsversuchs simuliert werden. Anhand der berechneten Kurve und des in Unterabschnitt 7.2.2 bzw. 7.2.3 ermittelten Bruchdrehmoments lässt sich zusätzlich der Bruchwinkel des späteren Spritzgießbauteils bestimmen (siehe Abbildung 7.21). Der auf diese Weise ermittelte Bruchwinkel des spritzgegossenen Mittelelements ( $\alpha_{B_{SG\_simuliert}}$ ) aus PA 12 GK 30 beträgt  $16,5^\circ$  und der des Elements aus PA 12 GK 50 liegt bei  $9,2^\circ$ .

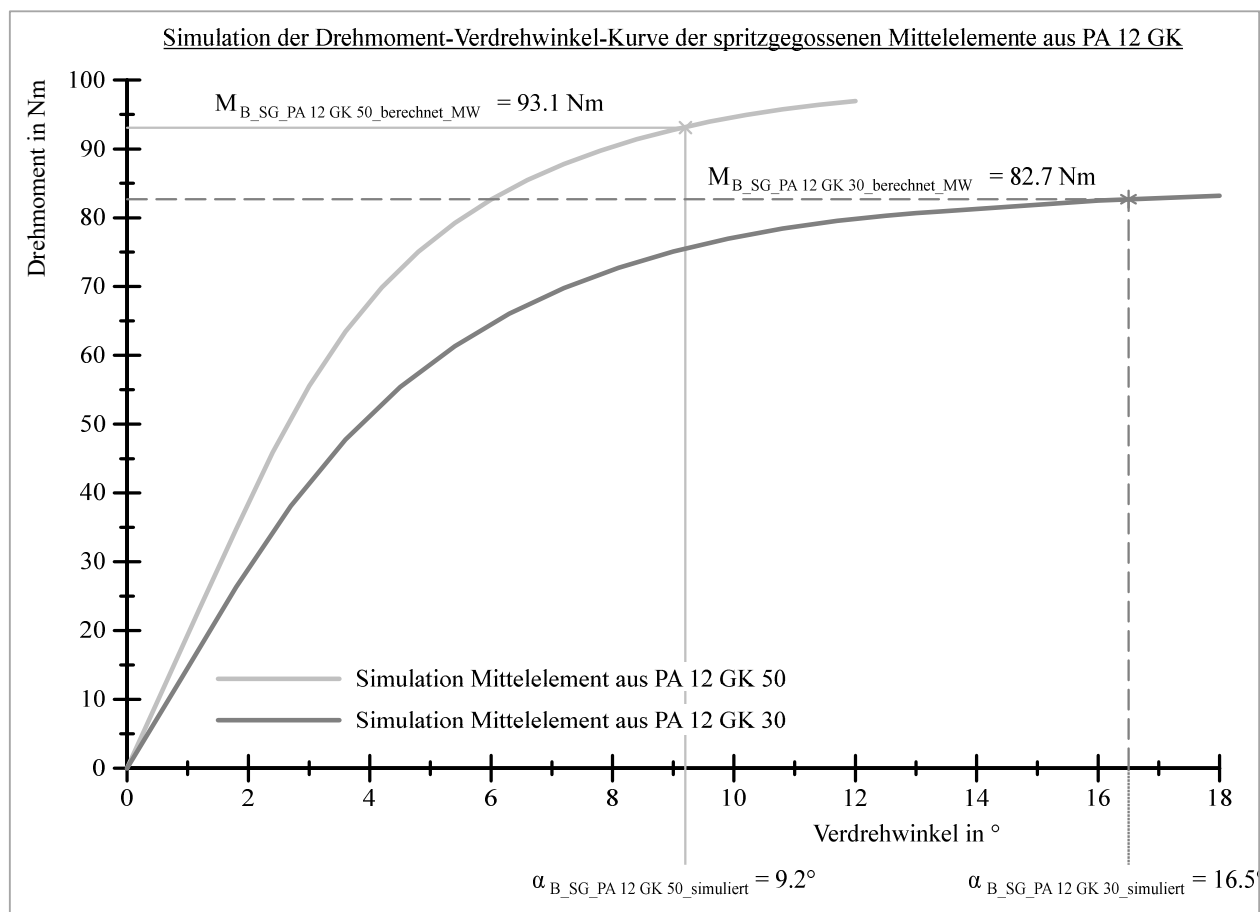


Abbildung 7.21: Simulation der Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven der spritzgegossenen Mittelelemente aus PA 12 GK 30 und PA 12 GK 50 mithilfe eines isotropen elastisch-plastischen Materialmodells

### 7.3.3 Simulation und Bauteilversuch im direkten Vergleich

Die Überlagerung der simulierten und der mithilfe des Torsionssteifigkeitsprüfstands ermittelten Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven der spritzgegossenen Bauteile ist in Abbildung 7.22 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die simulierte Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurve sowohl das Verhalten des spritzgegossenen Mittelelements aus PA 12 GK 50 als auch das des Elements aus PA 12 GK 30 sehr gut abbildet. Darüber hinaus ist in Abbildung 7.22 zu sehen, dass die Übereinstimmung zwischen der simulierten und der gemessenen Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurve beim Mittelelement aus PA 12 GK 50 mit steigendem Drehmoment schlechter wird. Ab einem Verdrehwinkel von ca.  $8,5^\circ$  geht das im Versuch gemessene Drehmoment sogar leicht zurück, wohingegen die simulierte Kurve weiterhin ansteigt. Die Gründe für den Abfall des Drehmoments sind zum einen irreversible Schädigungen im Spritzgießbauteil und zum anderen die für Polymerwerkstoffe typische Spannungsrelaxation im Bauteil (siehe Unterabschnitt 2.5.3), die grundsätzlich auch bei kurzzeitigen Belastungen vorhanden ist. Elastisch-plastische Materialmodelle, wie sie im Rahmen dieser Arbeit zur Simulation des Kurzzeit-Verhaltens des Funktionselements eingesetzt werden, berücksichtigen die Spannungsrelaxation jedoch nicht. Zur Berücksichtigung dieses Effekts in Verbindung mit plastischem Fließen wird ein viskoplastisches Materialmodell benötigt (siehe Unterabschnitt 6.2.2). Für die Erstellung eines derartigen Materialmodells werden umfangreiche Materialkennwerte benötigt, deren Ermittlung mit hohem Zeit- und Kostenaufwand verbunden ist. Inwieweit die Berücksichtigung der viskosen Effekte durch entsprechende Materialmodelle zu einer noch besseren Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch beitragen kann, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

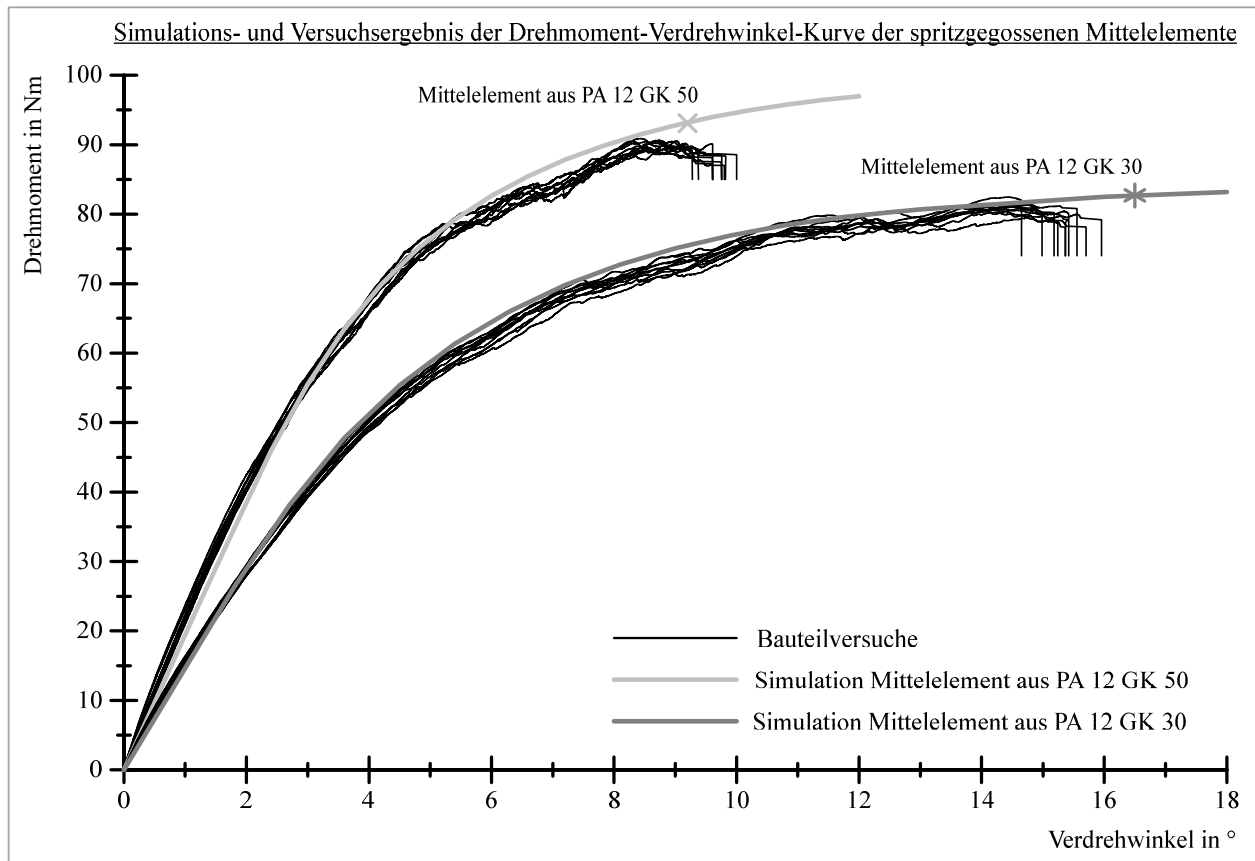


Abbildung 7.22: Direkter Vergleich zwischen der simulierten und der im Versuch gemessenen Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurve des spritzgegossenen Mittelelements

Der in Unterabschnitt 7.3.2 vorausbestimmte Bruchwinkel des Funktionselements aus PA 12 GK 30 ( $\alpha_{B\_SG\_PA\ GK\ 30\_simuliert}$ ) ist um 7,8 % größer als der arithmetische Mittelwert des gemessenen Bruchwinkels (siehe Tabelle 7.6). Im Gegensatz dazu ist der vorausberechnete Bruchwinkel des Funktionselements mit einem Glaskugengewichtsanteil von 50 % ( $\alpha_{B\_SG\_PA\ GK\ 50\_simuliert}$ ) im Mittel etwas kleiner als der Bruchwinkel der realen Bauteile. Der aus der simulierten Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurve abgeleitete Bruchwinkel ist um 5,2 % kleiner als der arithmetische Mittelwert des im Versuch gemessenen Bruchwinkels (siehe Tabelle 7.6).

Tabelle 7.6: Übersicht der Versuchs- und Simulationsergebnisse

<u>Mittelelement aus PA 12 GK 30</u>				<u>Mittelelement aus PA 12 GK 50</u>			
Kennwert	Quelle	Material	Wert	Kennwert	Quelle	Material	Wert
Bruchdrehmoment	Versuch	PA 12 GK 30	81 Nm	Bruchdrehmoment	Versuch	PA 12 GK 50	90,1 Nm
	Simulation	PA 12 GK 30	82,7 Nm		Simulation	PA 12 GK 50	93,1 Nm
Abweichung zw. Versuch und Simulation:			2,1 %	Abweichung zw. Versuch und Simulation:			3,3 %
Kennwert	Quelle	Material	Wert	Kennwert	Quelle	Material	Wert
Verdrehwinkel beim Bruch	Versuch	PA 12 GK 30	15,3 °	Verdrehwinkel beim Bruch	Versuch	PA 12 GK 50	9,7 °
	Simulation	PA 12 GK 30	16,5 °		Simulation	PA 12 GK 50	9,2 °
Abweichung zw. Versuch und Simulation:			7,8 %	Abweichung zw. Versuch und Simulation:			-5,2 %

### 7.3.4 Bewertung der quantitativen Absicherung durch Struktursimulation

Dieser Abschnitt zeigt, dass die Kombination von Prototypversuch und Struktursimulation dem Entwicklungsingenieur wie von Baur [8] beschrieben eine zusätzliche Erfahrungsebene bereitstellt. Durch den in Abschnitt 7.2 ermittelten quantitativen Zusammenhang zwischen dem Bruchdrehmoment eines laserge-

sinterten Technischen Prototyps und der Simulation des Kraft-Verformungs-Verhaltens mithilfe der anhand des Prototypversuchs verifizierten Struktursimulation kann der Bruchwinkel des späteren Spritzgießbauteils mit guter Genauigkeit vorausbestimmt werden. Die Abweichungen zwischen simuliertem und gemessenem Bruchwinkel liegen beim betrachteten Mittelelement der Ausgleichkupplung im mittleren einstelligen Prozentbereich. Anhand der in diesem Kapitel vorgestellten Vorgehensweise kann das Bauteilverhalten des späteren Spritzgießbauteils aus PA 12 GK in sehr guter Näherung vorausbestimmt werden.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Einsatzmöglichkeiten von lasergesinterten Prototypen im Entwicklungsprozess von thermoplastischen Spritzgießteilen aus glaskugelgefülltem PA 12. Aktuell werden generativ hergestellte Prototypen vorrangig zur Visualisierung von Produktkonzepten und nicht zur Durchführung von Belastbarkeitsuntersuchungen eingesetzt. Auf diese Weise können jedoch lediglich der ästhetische Eindruck und die äußere Form des späteren Spritzgießteils beurteilt werden. Um frühzeitig verlässliche Aussagen über das Kraft-Verformungs-Verhalten und die mechanische Belastbarkeit von Spritzgießteilen treffen zu können, ist es notwendig, einen quantitativen Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des lasergesinterten Prototyps und denen des späteren Serienteils herzustellen. Da derartige Untersuchungen bisher nicht oder nur wenig systematisch durchgeführt wurden, ist es das Ziel dieses Beitrags, mithilfe eines wissenschaftlichen Ansatzes zu überprüfen, ob durch die konsequente Einbindung von lasergesinterten Prototypen in den Entwicklungsprozess von glaskugelgefüllten Spritzgießbauteilen aus PA 12 GK ein signifikanter Mehrwert erzielt werden kann. Schwerpunktmäßig wird analysiert, ob mit Versuchen an lasergesinterten Prototypen Ergebnisse erzielt werden können, die zum einen die Absicherung von Simulationsergebnissen ermöglichen und zum anderen quantitative Rückschlüsse auf das Verhalten des späteren Spritzgießbauteils zulassen.

Der erste Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Gegenüberstellung der Fertigungsverfahren Lasersintern und Spritzgießen. Darüber hinaus wird sowohl das Werkstoffverhalten von Thermoplasten im Allgemeinen als auch die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 diskutiert. Der Vergleich der Fertigungsverfahren zeigt, dass grundsätzlich davon auszugehen ist, dass die mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten und spritzgegossenen Kunststoffbauteilen, die aus dem gleichen Werkstoff gefertigt werden, voneinander abweichen, da die beiden Verfahren sehr unterschiedlich sind. Dieses Ergebnis wird von der einleitenden Charakterisierung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der betrachteten Materialien bestätigt. Insbesondere das Vorhandensein von Poren und nicht aufgeschmolzenen Partikeln im Bauteilinneren, das typisch für lasergesinterte Bauteile ist, hat signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Für die Untersuchung des quantitativen Zusammenhangs bedeuten diese Erkenntnisse, dass eine sorgfältige Charakterisierung der Materialeigenschaften im Rahmen von Werkstoffprüfungen notwendig ist, bevor ein Vergleich auf Bauteilebene sinnvoll ist.

Im zweiten Teil der Arbeit wird das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 ausführlich analysiert und diskutiert. Dieser Schritt ist notwendig, da insbesondere die Materialkennwerte von Lasersintermaterialien bisher unzureichend untersucht und nur mangelhaft dokumentiert sind. Das Ziel der Materialcharakterisierung ist die Bereitstellung von grundlegenden und sorgfältig dokumentierten Materialkennwerten für lasergesintertes PA 12 GK. Darüber hinaus werden zum einen die mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK systematisch miteinander verglichen und zum anderen der quantitative Einfluss der Parameter Ausrichtung im Herstellungsprozess, Wasseraufnahme, Prüfgeschwindigkeit und Dicke des Probestabs auf die jeweiligen Werkstoffkennwerte bestimmt. Insbesondere die detaillierte Betrachtung und der direkte Vergleich des Einflusses der Glaskugeln in Verbindung mit dem Einfluss der Wasseraufnahme zeigen, dass die feuchtigkeitsbedingte Veränderung der Werkstoffkennwerte bei lasergesintertem PA 12 GK erheblich stärker ausgeprägt ist als bei spritzgegossenem PA 12 GK. Anhand von mikroskopischen Untersuchungen und strukturmechanischen Analysen an einem repräsentativen Volumenelement wird gezeigt, dass der Grund für die starke Ausprägung der feuchtigkeitsbedingten Eigenschaftsveränderungen beim glaskugelgefüllten Sintermaterial das Versagen der Grenzfläche zwischen Füllstoff und Polyamid-Matrix ist. Die Charakteri-

sierung des Einflusses der Ausrichtung im Herstellungsprozess zeigt, dass die Gründe für die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften von Lasersinter- und Spritzgießbauteilen grundsätzlich verschieden sind. Die zeilen- bzw. schichtweise Herstellung von Lasersinterteilen führt dazu, dass sie in Baurichtung eine geringere Steifigkeit, Festigkeit und Dehnbarkeit besitzen als senkrecht dazu. Die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten Bauteilen ist abhängig von der Lage der Raumkoordinaten der Sinteranlage und somit von der Ausrichtung des Bauteils im Fertigungsprozess. Im Gegensatz dazu ergeben sich die anisotropen Eigenschaften von Spritzgießbauteilen durch die lokalen Strömungsverhältnisse während der Formfüllung. Diese sind unabhängig von den Koordinaten der Spritzgießmaschine, wenn der Einfluss der Gravitationskraft vernachlässigt wird. Was die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 betrifft, wird im vorliegenden Beitrag anhand des direkten und systematischen Vergleichs nachgewiesen, dass sich das glaskugelgefüllte Lasersintermaterial transversal isotrop und das gefüllte Spritzgussmaterial isotrop verhält. Der Grund für die isotropen Eigenschaften des Spritzgussmaterials ist, dass Glaskugeln ein Aspektverhältnis von eins besitzen und somit keine Vorzugsorientierung aufweisen können. Die Charakterisierung der Faktoren Prüfgeschwindigkeit und Dicke des Probestabs zeigt, dass der quantitative Einfluss dieser Parameter auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von lasergesinterten und spritzgegossenen Zugproben vergleichbar ausgeprägt ist. Bei der Charakterisierung des Einflusses der Charge bzw. des Sinterexperten stellt sich heraus, dass die mechanischen Eigenschaften von Lasersinterbauteilen trotz der immer gleichen Randbedingungen bei der Fertigung um 15 bis 20 % schwanken können, wohingegen die mechanischen Eigenschaften von spritzgegossenen Probestäben chargenbedingt lediglich im niedrigen einstelligen Prozentbereich variieren. Die Ergebnisse der Charakterisierung der genannten Einflussfaktoren verdeutlichen, wie wichtig vollständig dokumentierte und unter eindeutigen sowie reproduzierbaren Randbedingungen ermittelte Werkstoffkennwerte sind. Dies gilt sowohl für Lasersinter- als auch für Spritzgusswerkstoffe. Der direkte Vergleich der Leistungsfähigkeit der beiden Materialien, die durch Lasersintern bzw. Spritzgießen verarbeitet werden, anhand von Materialkennwerten ist nur möglich, wenn die Angaben vollständig dokumentiert sind und unter definierten und eindeutig gekennzeichneten Randbedingungen ermittelt wurden. Insbesondere die Ausrichtung im Herstellungsprozess und der Konditionierungszustand sollten in Datenblättern von Sintermaterialien zukünftig aufgeführt werden.

Der dritte Teil der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich mit der Definition von Materialmodellen zur Abbildung des Kurzzeitverhaltens von lasergesinterten Bauteilen. Das Ziel dieses Teils ist es, herauszufinden welche Art von Materialmodell und welches Fließkriterium benötigt wird, um das Kurzzeitverhalten von lasergesinterten Bauteilen korrekt in der Strukturanalyse abzubilden. Zu diesem Zweck werden die in Bauteilversuchen ermittelten Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven von lasergesinterten Prototypen des Mittelelements einer Ausgleichskupplung und die mithilfe der FEM berechneten Kurven im Rahmen dieser Arbeit direkt gegenübergestellt. Diese wissenschaftlichen Untersuchungen liefern die Erkenntnis, dass das Kraft-Verformungs-Verhalten von flächigen Bauteilen, die im Sinterprozess parallel zur XY-Ebene ausgerichtet waren und in die keine nennenswerten Belastungen in Baurichtung eingeleitet werden, trotz der transversal isotropen Eigenschaften von lasergesintertem PA 12 GK durch die Verwendung eines elastisch-plastischen Materialmodells und des isotropen von Mises-Fließkriteriums sehr gut abgebildet werden kann. Was allerdings die Simulation des Bauteilverhaltens von dreidimensional orientierten Bauteilen betrifft, so wird anhand der Untersuchungen an parallel zur XZ-Ebene ausgerichteten Technischen Prototypen des Funktionselements der Kupplung gezeigt, dass für die Simulation des Verhaltens derartiger Bauteile ein Fließkriterium benötigt wird, das in der Lage ist, die transversal isotropen Materialeigenschaften von lasergesintertem PA 12 GK vollständig abzubilden. Die diskutierten Ergebnisse

belegen, dass das Hill-Fließkriterium für diesen Anwendungsfall sehr gut geeignet ist. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Bauteilversuche an lasergesinterten Prototypen sehr gut geeignet sind, um zu überprüfen, ob das Kurzzeit-Kraft-Verformungs-Verhalten eines Bauteils in der FEM-Simulation korrekt abgebildet wird. Durch die zusätzliche Erfahrungsebene eines Prototypversuchs, der die Belastungssituation des späteren Spritzgießbauteils widerspiegelt, ist der Berechnungsingenieur in der Lage, die gewählten Randbedingungen und Hypothesen seiner FEM-Simulation frühzeitig zu überprüfen. Dies erhöht die Sicherheit bei der Bauteilauslegung maßgeblich, da die Korrektheit von Simulationsergebnissen durch den Einsatz von kostengünstigen und schnell verfügbaren Lasersinterteilen frühzeitig verifiziert werden kann. Die direkte Gegenüberstellung von Simulations- und Versuchsergebnissen zeigt jedoch auch, wie wichtig eine gründliche Materialcharakterisierung ist, um eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation zu erreichen. Nur durch die Berücksichtigung des Einflusses der Ausrichtung des Bauteils während des Sinterprozesses sowie des Einflusses der Wasseraufnahme und der Geometrie, insbesondere der Wanddicke des Bauteils, sowohl bei der Erstellung des Materialmodells als auch bei der Wahl des Fließkriteriums, sind korrekte Simulationsergebnisse möglich.

Der letzte Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse des quantitativen Zusammenhangs zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem PA 12 GK 40 und spritzgegossenem PA 12 GK 50. Die Untersuchung wird in zwei Schritten durchgeführt. Als Erstes wird der quantitative Zusammenhang zwischen den Kennwerten Zug-E-Modul, Zugfestigkeit und Dehnung bei Zugfestigkeit für luftfeuchte Probestäbe betrachtet. Die ausführliche Diskussion der wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse zeigt, dass sowohl die Steifigkeit als auch die Zugfestigkeit des glaskugelgefüllten Spritzgussmaterials wesentlich größer sind als die jeweiligen Kennwerte der lasergesinterten Probestäbe. Bei der Dehnung bei Zugfestigkeit ist es umgekehrt. Hier ist der Kennwert der lasergesinterten Probestäbe größer als der der spritzgegossenen. Der Hauptgrund für die großen Unterschiede in den mechanischen Kennwerten von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK ist der sehr unterschiedlich stark ausgeprägte Einfluss der Wasseraufnahme. Im zweiten Schritt wird der quantitative Zusammenhang zwischen den Eigenschaften von lasergesinterten und spritzgegossenen Bauteilen betrachtet. Die wissenschaftlichen Untersuchungen werden mithilfe eines Funktionselements einer Ausgleichskupplung durchgeführt. Als Grundlage für die Diskussion des quantitativen Zusammenhangs zwischen den Bauteileigenschaften wird die Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurve des Bauteils in Torsionssteifigkeitsversuchen unter kurzzeitiger, monoton steigender Drehmomentbelastung aufgezeichnet. Die Analyse des quantitativen Zusammenhangs zwischen dem Bruchdrehmoment des lasergesinterten Technischen Prototyps und dem des spritzgegossenen Serienbauteils zeigt, dass das Bruchdrehmoment des Spritzgießbauteils mithilfe eines konstanten Faktors, der aus der Zugfestigkeit der jeweiligen Materialien ermittelt werden kann, mit sehr guter Übereinstimmung anhand der Belastbarkeit des lasergesinterten Prototyps berechnet werden kann (siehe Abbildung 8.1). Die Abweichung zwischen dem mithilfe des gefundenen Korrelationsansatzes vorausgerechneten und dem im Versuch gemessenen Bruchdrehmoment liegen im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Die Gültigkeit des ermittelten Zusammenhangs wurde im Rahmen dieser Arbeit für zwei Spritzgießwerkstoffe bewiesen. Die Analyse des quantitativen Zusammenhangs zwischen der Steifigkeit des Prototyps und der Steifigkeit des Spritzgießbauteils hat allerdings ergeben, dass es nicht möglich ist, aus der Kraft-Verformungs-Kurve des Sinterprototyps die entsprechende Kurve des Spritzgießbauteils abzuleiten. Aus diesem Grund wird im nächsten Schritt die, im dritten Teil dieser Arbeit durch Prototypversuche verifizierte, Struktursimulation eingesetzt, um die vollständige Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurve des betrachteten Bauteils abzubilden. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist, dass mithilfe der verifizierten Simulation das von der Belastungshöhe abhängige Bauteilverhalten sehr gut

vorausberechnet werden kann, wenn das Materialmodell entsprechend den mechanischen Eigenschaften des Spritzgussmaterials angepasst wird. In Verbindung mit der simulierten Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurve kann das anhand des quantitativen Zusammenhangs vorausbestimmte Bruchdrehmoment des Spritzgießteils genutzt werden, um zusätzlich den Verdrehwinkel beim Bruch zu bestimmen. Der prozentuale Unterschied zwischen dem gemessenen und dem berechneten Bruchwinkel liegt im mittleren einstelligen Prozentbereich. Insgesamt zeigt die Analyse des quantitativen Zusammenhangs zwischen den mechanischen Eigenschaften von lasergesintertem und spritzgegossenem PA 12 GK, dass die mechanische Belastbarkeit und das Kraft-Verformungs-Verhalten von Spritzgießbauteilen bereits in der Konzeptphase durch die geschickte Kombination von Bauteilversuchen an lasergesinterten Prototypen und durch den gezielten Einsatz von verifizierten Struktursimulationen sehr gut vorausbestimmt werden kann. Diese Absicherung der Belastbarkeit von Bauteilkonzepten, noch bevor die Serienwerkzeuge gefertigt werden, vergrößert die Sicherheit bei der Bauteilauslegung erheblich. Auf diese Weise können wichtige Entscheidungen, die oftmals von der Funktionserfüllung eines Bauteilkonzepts abhängen, frühzeitig und vor allem endgültig getroffen werden.

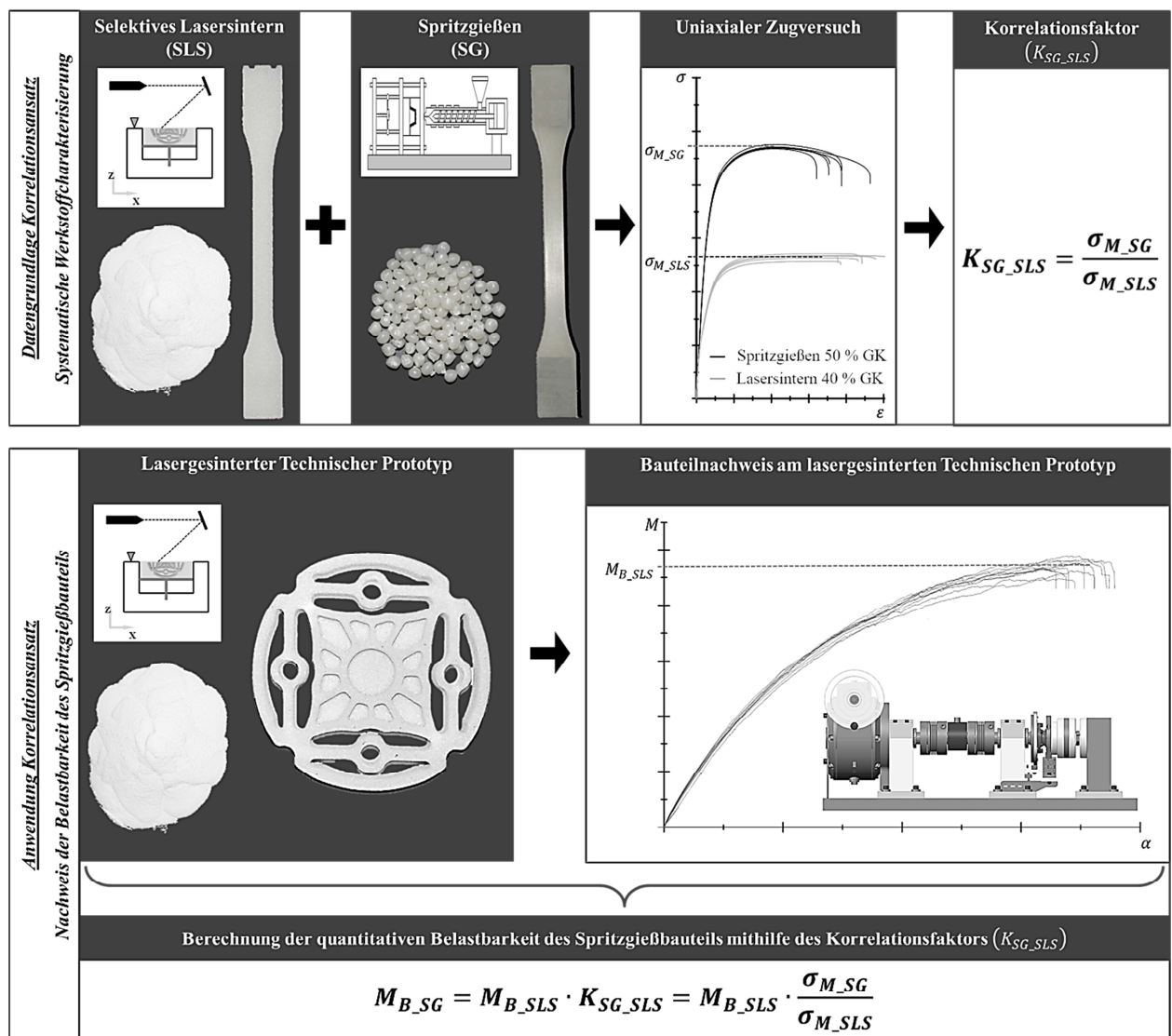


Abbildung 8.1: Darstellung der Vorgehensweise zur Anwendung des gefundenen Korrelationsansatzes

Abschließend muss festgestellt werden, dass die Frage, ob lasergesinterte Prototypen einen signifikanten Mehrwert im Entwicklungsprozess von Spritzgießbauteilen aus PA 12 GK darstellen können, differenziert beantwortet werden muss. Einerseits stellt die zusätzliche Sicherheit, die durch die Absicherung von

Simulationsergebnissen und die quantitative Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit des späteren Spritzgießbauteils aus PA 12 GK mithilfe des gefundenen Korrelationsansatzes gewonnen wird, einen signifikanten Mehrwert im Entwicklungsprozess dar. Der Korrelationsansatz ermöglicht es dem Konstrukteur, die mechanische Belastbarkeit von Bauteilkonzepten für Spritzgießteile anhand von realen Bauteilversuchen an lasergesinterten Prototypen zu verifizieren, bevor das Spritzgießwerkzeug beauftragt wird (siehe Abbildung 8.1). Diese Möglichkeit zur frühzeitigen und quantitativen Überprüfung der Funktionserfüllung erhöht die Sicherheit im Entwicklungsprozess für den Konstrukteur erheblich. Andererseits zeigt die intensive Diskussion der durchgeführten Untersuchungen auch, dass die mechanischen Eigenschaften des Sintermaterials sehr genau bekannt sein müssen, um eine gute Korrelation zwischen Prototyp und Serienbauteil zu erreichen. Somit verdeutlicht dieser Beitrag zum einem, welches Potenzial die konsequente Einbindung von lasergesinterten Prototypen in den Entwicklungsprozess von Spritzgießbauteilen und welche Möglichkeiten die generative Fertigung durch Selektives Lasersintern allgemein bietet. Zum anderen wird auch deutlich, dass noch weitere Untersuchungen notwendig sind, um das vorhandene Potenzial vollständig auszuschöpfen.

### Ausblick

Als Konsequenz aus den Untersuchungen in dieser Arbeit sollten die Materialhersteller von Sinterpulvern die Kennwertangaben in den Werkstoffdatenblättern zukünftig sorgfältiger dokumentieren. Auch die Aufnahme der Datenblätter dieser Materialien in herstellerübergreifende Datenbanken, wie beispielsweise der CAMPUS-Datenbank, ist empfehlenswert. Vor allem die Untersuchung des Einflusses der Wasseraufnahme zeigt, dass in weiteren Untersuchungen analysiert werden muss, wie die Festigkeit der Grenzfläche zwischen Glaskugel und Polyamid-Matrix soweit verbessert werden kann, dass sowohl die steifigkeitssteigernde als auch die festigkeitssteigernde Wirkung, die der Zusatz von Glaskugeln bewirkt, auch beim Sinterpolyamid vollständig genutzt werden kann.

Ein weiterer Anknüpfungspunkt für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen ist die detaillierte Betrachtung des Einflusses der Charge bzw. des Sinterexperten auf die mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten Bauteilen. Um Bauteilversuche an Lasersinterteilen zuverlässig zur Verifizierung von Simulationsergebnissen und zur Ermittlung der Belastbarkeit des späteren Spritzgießbauteils einsetzen zu können, muss die Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften signifikant verbessert werden. Dieser Schritt ist ebenfalls notwendig, um Selektives Lasersintern zukünftig als Produktionsverfahren für Endprodukte einsetzen zu können. Nur wenn die Reproduzierbarkeit der Bauteileigenschaften vergleichbar mit der des Spritzgießverfahrens ist, kann SLS eine echte Alternative für die Fertigung von Null- oder Kleinserien von Kunststoffteilen darstellen. Insbesondere die teilweise großen Schwankungen in Baurichtungen müssen minimiert werden. Zur Erreichung dieses Ziels müssen die Sinterexperten hinsichtlich des großen Einflusses des Alterungszustands des wiederverwendeten Pulvers auf die mechanischen Eigenschaften sensibilisiert werden. In weiteren Untersuchungen müssen in enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Sinterexperten Methoden entwickelt und implementiert werden, die die Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften gewährleisten. Ein wichtiger Punkt, der hierbei bearbeitet werden muss, ist das Handling des Altpulvers in Verbindung mit der Wahl der Anlagenparameter. Die im Rahmen dieser Arbeit diskutierten Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung einer konstanten Auffrischrate und eines konstanten Parametersatzes nicht ausreichend sind, um die Streuung der mechanischen Eigenschaften auf ein Niveau zu reduzieren, wie es beim Spritzgießen erreicht wird. Ansätze zum prozessnahen Qualitätsmanagement beim Lasersintern bzw. zur Klassifizierung des Altpulvers gemäß der Melt Flow Rate und

eine daraus abgeleitete Auffrischrate, wie sie von Mielicki [29] bzw. Dotchev [87] vorgeschlagen werden, müssen verfeinert und zum Standard in der industriellen Anwendung des Lasersinterverfahrens werden.

Durch die Verbesserung der Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften von lasergesinterten Bauteilen steigt auch der Mehrwert, den lasergesinterte Prototypen im Entwicklungsprozess von Spritzgießbauteilen darstellen können noch mal deutlich. Aufgrund der chargenbedingten Schwankungen der Materialeigenschaften ist es aktuell notwendig, dass das Materialmodell für die Struktursimulation bzw. der Umrechnungsfaktor zur Bestimmung der Bauteilbelastbarkeit des Spritzgießteils mithilfe von Werkstoffkennwerten erstellt wird, die an Probestäben ermittelt werden, die im gleichen Baujob gesintert wurden wie die betrachteten Prototypbauteile. Diese Einschränkung kann entfallen, wenn die Reproduzierbarkeit der Materialeigenschaften von lasergesinterten Probestäben/Bauteilen vergleichbar mit der von spritzgegossenen ist. Neben den in dieser Arbeit ausführlich diskutierten Kurzzeit-Eigenschaften von lasergesinterten Bauteilen sollten in weiteren Untersuchungen auch die Langzeit-Eigenschaften dieser Materialien grundlegend charakterisiert und mit denen von Spritzgussmaterialien verglichen werden. Es muss sowohl das Materialverhalten unter langzeitiger, konstanter oder langsam monoton steigender Belastung als auch unter dynamischer/zyklischer Belastung betrachtet werden. In diesem Zusammenhang ist weiterhin zu prüfen, ob auch für die zuvor genannten Belastungsarten ein quantitativer Zusammenhang zwischen der Belastbarkeit eines lasergesinterten Prototyps und der des späteren Spritzgießbauteils hergestellt werden kann. Dieser ermöglicht dann, zusätzlich zu dem in dieser Arbeit dargestellten Zusammenhang für die Kurzzeitbelastbarkeit, die Vorhersage des Langzeitverhaltens von Spritzgießteilen anhand von Prototypversuchen an lasergesinterten Bauteilen.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] **Brandt, Marcel Alexander Günter.** CAE-Methoden für die verbesserte Auslegung themoplastischer Spritzgussbauteile. [Dissertation]. Leverkusen : Brandt, Marcel Alexander Günter, 2006. ISBN 3-86130-850-9.
- [2] **Stommel, Markus, Stojek, Marcus und Korte, Wolfgang.** *FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*. München : Carl Hanser Verlag, 2011. ISBN 978-3-446-42124-0.
- [3] **Zonder, Lior und Sella, Nadav.** Präzisions-Prototyping. [Hrsg.] Stratasys. [White Paper]. 2014.
- [4] **Gebhardt, Andreas.** *Generative Fertigungsverfahren*. München : Carl Hasner Verlag, 2013. ISBN 978-3-446-43651-0.
- [5] **Bonten, Christian.** *Kunststofftechnik Einführung und Grundlagen*. München : Carl Hanser Verlag, 2014. ISBN 978-3-446-44093-7.
- [6] **Verein Deutscher Ingenieure e.V.** VDI 3404. *Generative Fertigungsverfahren Rapid-Technologien (Rapid Prototyping)*. [VDI-Richtlinie]. Düsseldorf : Beuth Verlag, Dezember 2009. VDI 3404.
- [7] **Bertsche, Bernd und Bullinger, Hans-Jörg, [Hrsg.].** *Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte-Rapid Prototyping*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2007. ISBN 978-3-540-69879-1.
- [8] **Baur, Erwin, et al., et al.** *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*. München : Carl Hanser Verlag, 2007. S. 421-431. ISBN 978-3-446-40352-9.
- [9] **Ehrenstein, Gottfried.** *Mit Kunststoffen konstruieren*. München : Carl Hanser Verlag, 2007. ISBN 978-3-446-41322-1.
- [10] **Baldinger, Matthias.** Herausforderungen beim Einstieg in 3D-Druck. *KunststoffXtra*. 7-8, 2015, S. 17-19.
- [11] **EOS.** <http://eos.materialdatacenter.com>. [Online] 2015. [Zitat vom: 24. August 2015.] <http://eos.materialdatacenter.com/eo/material/pdf/datasheet/PA2200Balance1.0?rnd=1440412639666&mdc5-main=if7s43ic6qa7g5ic9hh0f4ihm4>.
- [12] **EOS.** <http://eos.materialdatacenter.com>. [Online] 2015. [Zitat vom: 24. August 2015.] <http://eos.materialdatacenter.com/eo/material/pdf/datasheet/PA3200GF?rnd=1440412818838>.
- [13] **Schmid, Manfred.** *Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen*. München : Carl Hanser Verlag, 2015. ISBN: 978-3-446-44562-8.
- [14] **Moeskops, Eef, et al., et al.** Creep behaviour of Polyamide in selektive laser sintering. Eindhoven : TNO Industrial Technology, 2004. S. 60-67.
- [15] **Munguia, Javier und Dalgarno, Kenny.** Fatigue behaviour of laser-sintered PA12 specimens under four-point rotating bending. *Rapid Prototyping Journal*. 20, 2014, Bd. 4, S. 291-300.
- [16] **Bourell, David L., et al., et al.** Performance limitations in polymer laser sintering. *Physics Procedia*. 56, 2014, S. 147-156.
- [17] **Chemie Wirtschaftsförderungs-GmbH.** [www.campusplastics.com](http://www.campusplastics.com). [Online] 07. März 2016. [Zitat vom: 07. März 2016.] <http://www.campusplastics.com/campus/numsearch>.

- [18] **Griessbach, Sören, Lach, Ralf und Grellmann, Wolfgang.** Kleinserienfertigung hochfester Kunststoffbauteile. *Kunststoffe*. 5, 2008, S. 29-32.
- [19] **Muhs, Dieter, et al., et al.** *Roloff / Matek Maschinenelemente*. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 2005. ISBN 3-528-17028-X.
- [20] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.** DIN 740 Teil 2. *Nachgiebige Wellenkupplungen*. Berlin : Beuth Verlag, 1986. DIN 740 Teil 2 Aug 1986.
- [21] **Schmidt-Kupplung.** [Online] 2014.
- [22] **Breuninger, Jannis, et al., et al.** *Generative Fertigung mit Kunststoffen*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2013. ISBN 978-3-642-24324-0.
- [23] **Berkau, Andreas.** Polyamidguss contra Spritzguss - schnell und kostengünstig zum Kunststoffprototypen. *RTejournal*. 2007, 4.
- [24] **Brinkmann, Thomas.** *Handbuch Produktentwicklung mit Kunststoffen*. München Wien : Carl Hanser Verlag, 2011. ISBN 978-3-446-42243-8.
- [25] **Friedrich 2, Roland.** [www.mp.haw-hamburg.de](http://www.mp.haw-hamburg.de). [Online] 8. Oktober 2012.  
[Zitat vom: 22. Juli 2015.] [http://www.mp.haw-hamburg.de/fachberg/prod/vorlesungen\\_ptm/RP/RPT\\_2\\_2012\\_HAW.pdf](http://www.mp.haw-hamburg.de/fachberg/prod/vorlesungen_ptm/RP/RPT_2_2012_HAW.pdf).
- [26] **Fischer, Andreas.** 3D-Druck für die Produktion. *Kunststoffe*. 11, 2015, S. 34-39.
- [27] **Ajoku, Uzoma, et al., et al.** Investigating mechanical anisotropy and end-of-vector effect in laser-sintered nylon parts. [Hrsg.] Institution of Mechanical Engineers. *Journal of Engineering Manufacture*. 2006, Bd. 220 Part B, S. 1077-1086.
- [28] **Schmid, Manfred.** AM auf dem Weg in die Produktion. *Kunststoffextra*. 9, 2014, S. 6-9.
- [29] **Mielicki, Christoph.** Prozessnahes Qualitätsmanagement beim Lasersintern von Polyamid 12. [Dissertation]. Duisburg-Essen : Universität Duisburg-Essen, 2014.
- [30] **Spierings, A. B., Weiss, L. und Wegener, K.** Fachtagung Ressourcenschonung - von der Idee zum Handeln. *Ressourcenschonung mittels additiver Fertigung*. [Vortrag]. Wien : s.n., 29. / 30.. April 2014.
- [31] **Friedrich 4, Roland.** [www.mp.haw-hamburg.de](http://www.mp.haw-hamburg.de). [Online] 16. November 2012.  
[Zitat vom: 07. 22 2015.] [http://www.mp.haw-hamburg.de/fachberg/prod/vorlesungen\\_ptm/RP/RPT\\_4\\_2012\\_HAW.pdf](http://www.mp.haw-hamburg.de/fachberg/prod/vorlesungen_ptm/RP/RPT_4_2012_HAW.pdf).
- [32] **Gebhardt, Andreas.** *3D-Drucken Grundlagen und Anwendung des Additive Manufacturing (AM)*. München : Carl Hanser Verlag, 2014. 978-3-446-44238-2.
- [33] **Proto Labs.** *Herstellungsverfahren für Prototypen*. Telford Großbritannien : Proto Labs, 2011.
- [34] **Fastermann, Petra.** *3D-Druck/Rapid Prototyping*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2012. ISBN 978-3-642-29224-8.
- [35] **Neff, Martin und Keßling, Oliver.** Geschichtete Funktionsteile im industriellen Maßstab. *Kunststoffe*. 8, 2014.



- [36] **Schmachtenberg, E., et al., et al.** Wechselwirkungen Kunststoff - Laserprozess. *Zeitschrift Kunststofftechnik*. 4, 2008.
- [37] **Blueprinter**. <http://blueprinter-powder-3dprinter.co.uk>. [Online] 09. Juni 2015. [Zitat vom: 25. September 2015.] [http://blueprinter-powder-3dprinter.co.uk/sites/default/files/blueprinter\\_maj\\_2015\\_tryk\\_pages.pdf](http://blueprinter-powder-3dprinter.co.uk/sites/default/files/blueprinter_maj_2015_tryk_pages.pdf).
- [38] **Flury, Marianne**. Traditionsreiche Verfahren erhalten Zuwachs. *KunststoffXtra*. 9, 2014, S. 4-5.
- [39] **Ciraud, Léone Isaure Marie**. *Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung beliebiger Gegenstände aus beliebig schmelzbarem Material*. DE000002263777A Frankreich, 27. Dezember 1972. Offenlegungsschrift.
- [40] **Householder, Ross F.** *Molding Process*. US000004247508A USA, 3. Dezember 1979. U.S. Patent Document.
- [41] **Deckard, Carl R.** *Method and Apparatur for Producing parts by selective sintering*. US000004863538A USA Austin Texas, 5. September 1989. U.S. Patent.
- [42] **Schmid, Manfred**. Werkstoffe für das selektive Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen. *KunststoffXtra*. 03, 2011.
- [43] **Keller, Bernd**. *Rapid Prototyping: Grundlagen zum selektiven Lasersintern von Polymerpulvern*. s.l. : Shaker Verlag, 1999. ISBN 3-8265-6554-1.
- [44] **Wegner, Andreas und Witt, Gerd**. Betrachtung der Pulvernutzungsdauer beim Lasersintern und Einfluss der Prozessführung auf die Entstehung von Ausschussbauteilen. *RTEjournal*. 2012.
- [45] **Paternosta, Stefan**. *Auffrischoptimiertes PA 12-Pulver zur Verwendung in einem generativen Schichtbauverfahren*. EP 2 368 696 B1 Paris, 25. März 2010. Europäische Patentschrift.
- [46] **Klahn, Christoph und Leutenecker, Mirko**. Möglichkeiten einer neuen Technologie. *KunststoffXtra*. 9, 2014, S. 10-14.
- [47] **Kaddar, Wesam**. Die generative Fertigung mittels Lasersintern. [Dissertation]. Duisburg Essen : Universität Duisburg Essen, 2010.
- [48] **Blattmeier, Monika**. *Strukturanalyse von lasergesinterten Schichtverbunden mit werkstoffmechanischen Methoden*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2012. ISBN 978-3-8348-2500-1.
- [49] **Schepper, Bernd und Ewering, Jörg**. Teilkristalline und amorphe Kunststoffe - Deutliche Unterschiede. *PLASTVERARBEITER*. 55., 2003, 12.
- [50] **Scholten, Heinz**. *Verwendung eines Polyamids 12 für selektives Laser-Sintern*. DE 197 47 309 A 1 Deutschland, 29. April 1999. Offenlegungsschrift.
- [51] **Johannaber, Friedrich und Michaeli, Walter**. *Handbuch Spritzgießen*. München : Carl Hanser Verlag, 2004. ISBN 3-446-22966-3.
- [52] **Hopmann, Christian und Michaeli, Walter**. *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. München : Carl Hanser Verlag, 2015. ISBN: 978-3-446-44627-4.
- [53] **Ehrenstein, Gottfried**. *Polymer Werkstoffe*. München : Carl Hanser Verlag, 2011. ISBN 978-3-446-42283-4.

- [54] **Kaiser, Wolfgang.** *Kunststoffchemie für Ingenieure - Von der Synthese bis zur Anwendung.* München : Carl Hanser Verlag, 2011. ISBN 978-3-446-43047-1.
- [55] **Menges, Georg, et al., et al.** *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe.* München : Carl Hanser Verlag, 2011. ISBN 978-3-446-42762-4.
- [56] **Philippovich, Alexander.** *Chemisch-physikalische Grundlagen der Verwendung von Erdöl und seinen Produkten.* Wien : Springer-Verlag, 1960. ISBN: 978-3-7091-7897-3.
- [57] **Steuernagel, Leif.** *Skript PW I.* 2014.
- [58] **Frick, Achim und Stern, Claudia.** *DSC-Prüfungen in der Anwendung.* München : Carl Hanser Verlag, 2013. ISBN: 978-3-446-43690-9.
- [59] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.** DIN EN ISO 11357-1. *Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 1.* Berlin : Beuth Verlag, März 2010. DIN EN ISO 11357-1:2010-03.
- [60] **Eyerer, Peter, Hirth, Thomas und Elsner, Peter, [Hrsg.].** *Polymer Engineering.* Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-72402-5.
- [61] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.** DIN EN ISO 11357-2. *Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 2.* Berlin : Beuth Verlag, Juli 2014. DIN EN ISO 11357-2:2014-07.
- [62] **Gieler, Rolf P. und Dimming-Osburg, Andrea.** *Kunststoffe für den Bautenschutz und die Betoninstandsetzung.* Basel : Birkhäuser Verlag, 2006. ISBN-10: 3-7643-6345-1.
- [63] **Rösler, Joachim, Harders, Harald und Bäker, Martin.** *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe.* Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2012. ISBN 978-3-8348-1818-8.
- [64] **Hellerich, Walter, Harsch, Günther und Baur, Erwin.** *Werkstoff-Führer Kunststoffe Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte.* München : Carl Hanser Verlag, 2010. ISBN: 978-3-446-42436-4.
- [65] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.** DIN EN ISO 1110. *Polyamide - Beschleunigte Konditionierung von Probekörpern.* Berlin : Beuth Verlag, März 1998. DIN EN ISO 1110 : 1998-03.
- [66] **Skrabala, Otto und Bonten, Christian.** Kritische Dehnung als Parameter für die Versagensbestimmung. *Kunststoffe.* 9, 2012, S. 82-85.
- [67] **Dallner, C. und Ehrenstein, G. W.** Thermische Einsatzgrenzen von Kunststoffen Teil 1: Kriechverhalten unter statischer Belastung. *Zeitschrift Kunststofftechnik.* 2, 2006, 3, S. 1-31.
- [68] **Glaser, Stefan und Wüst, Andreas.** Modellierung am Computer. *Kunststoffe.* 3, 2005, S. 132-136.
- [69] **Zarringhalam, Hadi, Majewski, Candice und Hopkinson, Neil.** Degree of Particle melt in Nylon-12 selective laser-sintered parts. *Rapid Prototyping Journal.* 2009, Bd. 15, 2, S. 126-132.
- [70] **Ajoku, Uzoma, Hopkinson, Neil und Caine, Mike.** Experimental measurement and finite element modelling of the compressive properties of laser sintered Nylon-12. *Materials Science and Engineering.* 428, 2006, S. 211-216.

- [71] **Kaddar, Wesam und Witt, Gerd.** Die Festigkeit in Abhängigkeit von Scanstrategien & -optionen beim Lasersintern von Kunststoff. *RTejournal*. 2010.
- [72] **Van Hooreweder, Brecht, et al., et al.** Microstructural characterization of SLS-PA12 specimens under dynamic tension/compression excitation. *Polymer Testing*. 29, 2010, S. 316-326.
- [73] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.** DIN EN ISO 604. *Bestimmung von Druckeigenschaften*. Berlin : Beuth Verlag, 2003. DIN EN ISO 604:2003-12.
- [74] **Korte, Wolfgang und Stojek, Marcus.** Festigkeitsnachweis von technischen Kunststoffteilen. [Hrsg.] PART Engineering GmbH. [Schulungsunterlagen]. Stuttgart/Hannover : s.n., Dezember 2015.
- [75] **Mattheck, Claus.** *Warum alles kaputt geht: Form und Versagen in Natur und Technik*. Karlsruhe : Forschungszentrum Karlsruhe, 2003. ISBN: 3-923704-41-0.
- [76] **Blattmeier, Monika, et al., et al.** Technologische Reife für Endprodukte? *Kunststoffe*. 11, 2010, S. 105-109.
- [77] **Danjou, Stéphane und Köhler, Peter.** Ermittlung optimaler Bauteilorientierung zur Verbesserung der Prozessplanung in der CAD/VP-Kette. *RTejournal*. 2009.
- [78] **EOS.** Basic design rules for laser sintering. [Online] 2012. [Zitat vom: 13. 04 2015.] [http://www.handling.de/upload/06-Basic-design-rules-for-laser-sintering\\_24906.pdf](http://www.handling.de/upload/06-Basic-design-rules-for-laser-sintering_24906.pdf).
- [79] **Johannaber, Friedrich und Michaeli, Walter.** *Handbuch Spritzgießen*. München : Carl Hanser Verlag, 2004. ISBN 3-446-22966-3.
- [80] **Meyer, Bernd-Rüdiger und Falke, Dirk.** *Maßhaltige Kunststoff-Formteile*. München : Carl Hanser Verlag, 2013. ISBN: 978-3-446-43687-9.
- [81] **Evonik Industries.** *Polymer und Laser*. Marl : Evonik Industries, 2008. <http://www.vestodur.de/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/VESTODUR/de/broschueren/Polymer%20und%20Laser.pdf>.
- [82] **Bliedtner, Jens, Müller, Hartmut und Barz, Andrea.** *Lasermaterialbearbeitung*. München : Carl Hanser Verlag, 2013. ISBN 978-3-446-42168-4.
- [83] **Exner, Horst und Ebert, Robby.** Selektives Lasersintern Präzise Bauteile schnell generiert - ein Überblick. *Laser Technik Journal*. September, 2008, Nr. 4, S. 51-53.
- [84] **Brecher, Christian, [Hrsg.].** *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2011. ISBN 978-3-642-20692-4.
- [85] **Wegner, Andreas und Witt, Gerd.** Ursachen für eine mangelnde Reproduzierbarkeit beim Lasersintern von Kunststoffbauteilen. *RTejournal*. 2013, S. 1-28.
- [86] **Sauer, Andreas und Witt, Gerd.** Optimierung der Eigenschaften von thermoplastischen Lasersinter-Bauteilen. *RTejournal*. 2, 2005, 2.
- [87] **Dotchev, Krassimir und Yusoff, Wan.** Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process. *Rapid Prototyping Journal*. 15/3, 2009, S. 192-203.

- [88] **Schmid, Manfred.** <https://www.inspire.ethz.ch>. [Online] 29. September 2015. [Zitat vom: 29. September 2015.] [https://www.inspire.ethz.ch/ConfiguratorJM/publications/Verhalten\\_\\_141882114954868/AM\\_Seminar\\_IWU\\_Augsburg\\_M.Schmid.pdf](https://www.inspire.ethz.ch/ConfiguratorJM/publications/Verhalten__141882114954868/AM_Seminar_IWU_Augsburg_M.Schmid.pdf).
- [89] **Fiedler, Lothar, et al., et al.** Experimentelle Simulation der physikalischen Alterung von Lasersinterpulvern. *Zeitschrift Kunststofftechnik*. 6, 2010, 1, S. 20-32.
- [90] **Rietzel, Dominik, Drexler, M. und Drummer, D.** Grundlegende Betrachtungen zur Modellierung transienter thermischer Vorgänge beim selektiven Lasersintern. *RTejournal*. 2011.
- [91] **Gebhardt, Christof.** *Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench*. München : Carl Hanser Verlag, 2011. ISBN 978-3-446-42517-0.
- [92] **Rietzel, Dominik, et al., et al.** Neue Kunststoffpulver für das Selektive Lasersintern. *Kunststoffe*. 2, 2008, S. 65-68.
- [93] **Rietzel, Dominik, Kühnlein, Florian und Drummer, Dietmar.** Selektives Lasersintern von teilkristallinen Thermoplasten. *RTejournal*. 2009, S. 1-14.
- [94] **Yuan, Mengqi, et al., et al.** Thermal conductivity of polyamide 12 powder for use in laser sintering. *Rapid Prototyping Journal*. 19, 2013, Bd. 6, S. 437-445.
- [95] **Keller, Peter.** Der Stoff aus dem die Prototypen sind. *KU Kunststoffe*. Jahrg. 89, 1999, Bd. 11, S. 58-61.
- [96] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.** DIN 50035. *Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, September 2012. DIN 50035:2012-09.
- [97] **Seul, Th.** Ansatz zur Werkstoffoptimierung beim Lasersintern durch Charakterisierung und Modifizierung grenzflächenenergetischer Phänomene. *IKV - Berichte aus der Kunststoffverarbeitung*. 2004. Bd. 149, 1. Auflage. Originalquelle habe ich nicht Zitat aus Fiedler S.21 \_Experimentelle Sim... \_ 2009 und mielicki S.8 entnommen.
- [98] **Becker, Gerhard und Braun, Dietrich, [Hrsg.].** *Kunststoff Handbuch 3/4 Polyamide*. München Wien : Carl Hanser Verlag, 1998.
- [99] **Wudy, K., et al., et al.** [Hrsg.] AIP Conference Proceedings 1593. *Influence of Degradation Behavior of Polyamid 12 Powders in Laser Sintering Process on Produced Parts*. s.l. : AIP Publishing, 2014. 691. doi: 10.1063/1.4873873.
- [100] **Wegner, Andreas, Witt, Gerd und Karg, Wolfgang.** Auffrischstrategien für Polyamid 12-Pulver. *Kunststoffe*. 11, 11 2013, S. 76-78.
- [101] **Gornet, T. J., et al., et al.** Characterization of selective laser sintering materials to determine process stability. [Konferenzbeitrag]. Austin Texas : Symposium, Solid Freeform Fabrication, August 2002. Seiten 546-553.
- [102] **Monsheimer, Sylvia, et al., et al.** *Laser-Sinter-Pulver mit verbesserten Recyclingeigenschaften, Verfahren zu dessen Herstellung und Verwendung des Laser-Sinter-Pulvers*. DE 103 30 590 A1 Deutschland, 17. Oktober 2002. Offenlegungsschrift.
- [103] **Schmid, Manfred.** <http://www.coachulting.de>. [Online] 11. März 2015. [Zitat vom: 23. September 2015.] <http://www.coachulting.de/gpages/forum2015/inspire.pdf>.

- [104] **Polytron Kunststofftechnik GmbH & Co. KG.** [www.polytron-gmbh.de](http://www.polytron-gmbh.de). [Online] 2015. [Zitat vom: 07. September 2015.] [www.polytron-gmbh.de/datenblatt-polytron-pa-12.pdf?forced=true](http://www.polytron-gmbh.de/datenblatt-polytron-pa-12.pdf?forced=true).
- [105] **EMS-Chemie GmbH.** <http://www.emsgrivory.com>. [Online] 2015. [Zitat vom: 07. September 2015.] [http://www.emsgrivory.com/fileadmin/ems-grivory/documents/brochures/Grilamid-L-PA12\\_3001\\_de.pdf](http://www.emsgrivory.com/fileadmin/ems-grivory/documents/brochures/Grilamid-L-PA12_3001_de.pdf).
- [106] **EOS GmbH.** <https://ip-saas-eos-cms.s3-eu-west-1.amazonaws.com>. [Online] 18. Juni 2014. [Zitat vom: 27. Juli 2015.] [https://ip-saas-eos-cms.s3-eu-west-1.amazonaws.com/public/432a20aaac92ae33/29e5b10dd2465037f5bcb09991df9510/EOS\\_Datenblatt\\_EOSINT\\_P800.pdf](https://ip-saas-eos-cms.s3-eu-west-1.amazonaws.com/public/432a20aaac92ae33/29e5b10dd2465037f5bcb09991df9510/EOS_Datenblatt_EOSINT_P800.pdf).
- [107] **EMS-Chemie.** <http://ems.materialdatacenter.com>. [Online] 2015\_1. [Zitat vom: 13. November 2015.] <http://ems.materialdatacenter.com/eg/de/main/ds/Grilamid+L+20+G>.
- [108] **EMS-Chemie.** <http://ems.materialdatacenter.com>. [Online] 2015\_2. [Zitat vom: 13. November 2015.] <http://ems.materialdatacenter.com/eg/material/pdf/datasheet/?mdc5=88f48isbfifrci78gov3jukh74>.
- [109] **EMS-Chemie.** <http://ems.materialdatacenter.com>. [Online] 2015\_3. [Zitat vom: 13. November 2015.] <http://ems.materialdatacenter.com/eg/de/main/ds/Grilamid+LKN-3H>.
- [110] **EMS-Chemie.** <http://ems.materialdatacenter.com>. [Online] 2015\_4. [Zitat vom: 13. November 2015.] <http://ems.materialdatacenter.com/eg/material/pdf/datasheet/?mdc5=88f48isbfifrci78gov3jukh74>.
- [111] **EMS-Chemie.** <http://ems.materialdatacenter.com>. [Online] 2015\_5. [Zitat vom: 13. November 2015.] <http://ems.materialdatacenter.com/eg/de/main/ds/Grilamid+LKN-5H>.
- [112] **EMS-Chemie.** <http://ems.materialdatacenter.com>. [Online] 2015\_6. [Zitat vom: 13. November 2015.] <http://ems.materialdatacenter.com/eg/material/pdf/datasheet/?mdc5=88f48isbfifrci78gov3jukh74>.
- [113] **1zu1prototypen.** [www.1zu1prototypen.com](http://www.1zu1prototypen.com). [Online] 2015. [Zitat vom: 2015. November 11.] <https://www.1zu1prototypen.com/urmodelle/materialien.htm>.
- [114] **Vordermann, Yves, Ehrig, Frank und Kunz, Johannes.** Probekörperdicke beeinflusst mechanische Eigenschaften. *Kunststoffe*. 9, 2013.
- [115] **Kunz, Johannes.** Bauteilauslegung mit Augenmaß. *Kunststoffe*. 2013, 12, S. 56-60.
- [116] **DIN Deutsches Institut für Normung e.V.** DIN EN ISO 527 Teil 1 bis 4. *Bestimmung der Zugeigenschaften*. Berlin : Beuth Verlag, 1996, 1997, 2003. DIN EN ISO 527-1 : 1996-04; DIN EN ISO 527-2 : 1996-07; DIN EN ISO 527-3 : 2003-07; DIN EN ISO 527-4 : 1997-07;.
- [117] **Grellmann, Wolfgang und Seidler, Sabine.** *Kunststoffprüfung*. München : Carl Hanser Verlag, 2011. ISBN 978-3-446-42722-8.
- [118] **Dripke, Manfred und Michalzik, Günter.** *Der Zugversuch bei quasi-statischer Beanspruchung*. Wuppertal : Castell-Verlag GmbH, 2002.
- [119] **Baur, Erwin, et al., et al.** *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*. München : Carl Hanser Verlag, 2013. ISBN 978-3-446-43729-6.

- [120] **Menges, G. und Roskothen, H. J.** Deformations as a New Criterion for Dimensioning of Plastic Structures. *Journal of Macromolecular Science: Part A - Chemistry*. 6, 1972, 3, S. 631-640.
- [121] **Aurich, Torsten.** Spritzgießen und resultierende Verbundeigenschaften von flachsfaserverstärktem Polypropelen. [Dissertation]. Chemnitz : Technische Universität Chemnitz, 2000.
- [122] **BASF.** <http://www.plasticsportal.net>. [Online] 25. Februar 2015. [Zitat vom: 13. November 2015.] [http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de\\_DE/function/conversions:/publish/common/upload/engineering\\_plastics/Ultramid\\_brochure.pdf](http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/function/conversions:/publish/common/upload/engineering_plastics/Ultramid_brochure.pdf).
- [123] **Bührig-Polaczek, Andreas, Michaeli, Walter und Spur, Günter.** *Handbuch Urformen*. München : Carl Hanser Verlag, 2014. ISBN: 978-3-446-42035-9.
- [124] **Gächter, R. und Müller, H., [Hrsg.].** *Taschenbuch der Kunststoffadditive*. München Wien : Carl Hanser Verlag, 1990. ISBN: 3-446-15627-5.
- [125] **Friedrich, Stefan.** <http://solutions.3mdeutschland.de>. [Online] 18. April 2012. [Zitat vom: 23. November 2015.] [http://solutions.3mdeutschland.de/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1334759057000&locale=de\\_DE&assetType=MMM\\_Image&assetId=1319226417526&blobAttribute=ThumbnailImage](http://solutions.3mdeutschland.de/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1334759057000&locale=de_DE&assetType=MMM_Image&assetId=1319226417526&blobAttribute=ThumbnailImage).
- [126] **Wieland, Bernhard und Simon, Ulrich.** <https://www.uni-ulm.de>. [Online] 2012. Dezember 2012. [Zitat vom: 13. November 2014.] [https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website\\_uni\\_ulm/uzwr/mmsm/mmsm1-ws1213/mmsm1-handout-anisotropie.pdf](https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/uzwr/mmsm/mmsm1-ws1213/mmsm1-handout-anisotropie.pdf).
- [127] **ETH.** <https://www1.ethz.ch>. [Online] September 2010. [Zitat vom: 08. November 2014.] [https://www1.ethz.ch/structures/education/bachelor/faserverstaerkte\\_kunststoffe/Skript/151-0363\\_03\\_Anisotropie.pdf](https://www1.ethz.ch/structures/education/bachelor/faserverstaerkte_kunststoffe/Skript/151-0363_03_Anisotropie.pdf).
- [128] **Seidel, Christian, et al., et al.** <http://www.esocaet.com>. [Online] 30. Oktober 2015. [Zitat vom: 30. November 2015.] <http://www.esocaet.com/wikiplus/images/d/d7/UM2013-2.02.08.pdf>.
- [129] **Beaumont, John P.** *Auslegung von Anguss und Angusskanal*. München : Carl Hanser Verlag, 2012. ISBN: 978-3-446-42759-4.
- [130] **Bonnet, Martin.** *Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner GWV Fachverlage GmbH, 2009. ISBN 978-3-8348-0349-8.
- [131] **Kotter, Ines, et al., et al.** [www.polymerservice-merseburg.de](http://www.polymerservice-merseburg.de). [Online] 13. Januar 2009. [Zitat vom: 16. Dezember 2015.] [http://www.polymerservice-merseburg.de/fileadmin/sachverstaendigenbuero/pdfs/publ\\_298.pdf](http://www.polymerservice-merseburg.de/fileadmin/sachverstaendigenbuero/pdfs/publ_298.pdf).
- [132] **Kurr, Friedrich.** *Praxishandbuch der Qualitäts- und Schadensanalyse für Kunststoffe*. München : Carl Hanser Verlag, 2014. ISBN: 978-3-446-43775-3.
- [133] **Rösler, M.** <http://public.beuth-hochschule.de>. [Online] 14. Januar 2014. [Zitat vom: 15. März 2016.] [http://public.beuth-hochschule.de/~roeslerm/Skript/WiIng\\_Baustoffe\\_Glas.pdf](http://public.beuth-hochschule.de/~roeslerm/Skript/WiIng_Baustoffe_Glas.pdf).
- [134] **3D Systems.** <http://www.3dsystems.com>. [Online] 2012. [Zitat vom: 30. Juni 2015.] [http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/DS\\_DuraForm\\_GF\\_US.pdf](http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/DS_DuraForm_GF_US.pdf).
- [135] **Haberstroh, Edmund und Brandt, Marcel.** Determination of Mechanical Properties of Thermoplastics Suitable for Micro Systems. *Macromolecular Materials and Engineering*. 287, Dezember 2002, 12, S. 881-888.

- [136] **Schubnell, Markus.** <https://de.mt.com>. [Online] 2001. [Zitat vom: 03. März 2016.] [https://de.mt.com/dam/mt\\_ext\\_files/Editorial/Simple/0/polymere\\_kristallinitaetdsctausercom13ds1213.pdf](https://de.mt.com/dam/mt_ext_files/Editorial/Simple/0/polymere_kristallinitaetdsctausercom13ds1213.pdf).
- [137] **Guster, Christoph, et al., et al.** Simulation der Lebensdauer faserverstärkter Spritzgussteile. *Kunststoffe*. 9, 2013, S. 158-161.
- [138] **esocaet.** <http://www.esocaet.com>. [Online] 2015. [Zitat vom: 28. Oktober 2015.] <http://www.esocaet.com/wikiplus/index.php/Verfestigung>.
- [139] **Nasdala, Lutz.** *FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2015. ISBN 978-3-658-06629-1.
- [140] **CADFEM.** Berechnung des Werkstoffverhaltens von Kunststoffen. [Seminarunterlagen zum gleichnamigen CADFEM-Seminar]. 2015.
- [141] **Hill, R.** *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford New York : Oxford University Press, 1950. ISBN 0-19-850367-9.
- [142] **Hill, R.** A Theory of the Yielding an Plastic Flow of Anisotropic Metals. *Proceedings of the Royal Society*. [Online] 27. Mai 1948. [Zitat vom: 22.10.2014. Oktober 2014.] <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/193/1033/281#related-urls>.
- [143] **ANSYS.** 3.4.2.1.2. Hill Yield Criterion. *ANSYS 14.5.7 Hilfe*. 2014.
- [144] **Backes, Björn.** *Mikrostruktureller Einfluss auf das Indentierungsverhalten bei metallischen Werkstoffen*. Erlangen : Dissertatio Universität Erlangen-Nürnberg, 2009.
- [145] **Imaoka, Sheldon.** Hills's Potential. *Sheldon's ANSYS Tips*. [Online] 30. August 2008. [Zitat vom: 23. Oktober 2014.] [http://ansys.net/sheldon\\_tips/](http://ansys.net/sheldon_tips/). STI0808A.
- [146] **Ruhland, Harald.** Berücksichtigung herstellungsbedingter Einflüsse in der Simulation von Spritzgussbauteilen. [Foliensatz zum CADFEM-Seminar]. Hannover : RICON GmbH, 2014.
- [147] **Hopmann, Christian und Van Haag, Jan.** Bindenähte in kurzfaserverstärkten Bauteilen simulieren. *Kunststoffe*. 8, 2012, S. 46-49.
- [148] **Abts, Georg.** *Kunststoff-Wissen für Einsteiger*. München : Carl Hanser Verlag, 2014. ISBN: 978-3-446-43925-2.
- [149] **Korte, Wolfgang.** FEM Prozess-Struktur-Kopplung für spritzgegossene Kunststoffteile. [Hrsg.] PART Engineering. *Werkstoffverhalten und FEM-Simulation von kurzfaserverstärkten Kunststoffbauteilen*. [Seminarunterlagen]. Stuttgart / Hamburg / Bergisch Gladbach : s.n., Dezember 2012.
- [150] **Halpin, J. C. und Kardos, J. L.** The Halpin-Tsai Equations: A Review. *Polymer Engineering & Science*. May, 1976, Bd. 16, 5, S. 344-352.
- [151] **Baur, Richard und Rentsch, Arno.** *Kunststoffgehäuse mit einem verschleißenden Deckel aus mit Glaskugeln gefülltem Kunststoff*. DE10027073C1 Deutschland, 31. Mai 2000. Patentschrift.

## 10 Anhang

### 10.1 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
3D	Dreidimensional	[–]
3DP	3D-Printing	[–]
A	Absorptionsgrad	[–]
AKF	Arburg Kunststoff-Freiformen	[–]
AM	Additive Manufacturing	[–]
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	[–]
CAD	Computer Aided Design	[–]
CAMPUS	Computer Aided Material Preselection by Uniform Standards	[–]
CH	Charge	[–]
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid	[–]
DI	Probestab direkt gespritzt	[–]
DIN	Deutsches Institut für Normung	[–]
DLP	Digital Light Processing	[–]
DSC	Differential Scanning Calorimetry	[–]
EBM	Elektron Beam Melting	[–]
E-Modul	Elastizitätsmodul	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
EN	Europäische Norm	[–]
EXP	Sinterexperte	[–]
FDM	Fused Deposition Modeling	[–]
FEM	Finite-Elemente-Methode	[–]
FE-Modell	Finite-Elemente-Modell	[–]
FLM	Fused Layer Modeling/Manufacturing	[–]
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse	[–]
GF	bei Sintermaterialien glasgefüllt	[–]
GF	Glasfaser	[–]
GK	Glaskugel	[–]
H	Probendicke	[–]
IKT	Institut für Kunststofftechnik	[–]
ISO	International Organization for Standardization	[–]



LCVD	Laser Chemical Vapor Deposition	[–]
If	luftfeucht	[–]
LLM	Layer Laminated Manufacturing	[–]
LOM	Laminated Object Manufacturing	[–]
LS	Lasersintern	[–]
MFR	Melt Flow Rate	[g/min]
MJM	Multi Jet Modeling	[–]
MS	Maskensintern	[–]
MW	Mittelwert	[–]
Normklima 23/50	Normklima mit 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit	[–]
P	Probestab aus Platte herausgefräst	[–]
PA 12 GK	glaskugelgefülltes Polyamid 12	[–]
PA 12	Polyamid 12	[–]
PA 6	Polyamid 6	[–]
PA	Polyamid	[–]
PC	Polycarbonat	[–]
PEEK	Polyetheretherketon	[–]
PG	Prüfgeschwindigkeit	[–]
PJM	Poly-Jet Modeling	[–]
PMMA	Polymethylmethacrylat	[–]
POM	Polyoxymethylen	[–]
PP	Polypropylen	[–]
PS	Polystyrol	[–]
RM	Rapid-Manufacturing	[–]
RP	Rapid Prototyping	[–]
RT	Rapid-Tooling	[–]
RVE	Repräsentatives Volumenelement	[–]
SEA	Schallemissionsanalyse	[–]
sf	sinter- bzw. spritzfrisch	[–]
SG	Spritzgießen	[–]
SHS	Selective Heat Sintering	[–]
SLA	Stereolithografie	[–]

SLM	Selektives Strahlschmelzen	[–]
SLS	Selektives Lasersintern	[–]
STL	Surface Tessellation Language	[–]
T	Temperatur	[°C]
TTM	Time-to-Market	[–]
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	[–]

## 10.2 Formelzeichenverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
$A$	Abminderungsfaktor	[–]
$a$	Aspektverhältnis	[–]
$A_i$	im Zugversuch aktuell vorhandene Probequerschnittsfläche	[mm <sup>2</sup> ]
$A_o$	Ausgangsquerschnittsfläche der Zugprobe	[mm <sup>2</sup> ]
$C_T$	Torsionssteifigkeit	[Nm/°]
$C_{T\_LS}$	Torsionssteifigkeit lasergesintertes Mittelelement	[Nm/°]
$C_{T\_SG}$	Torsionssteifigkeit spritzgegossenes Mittelelement	[Nm/°]
$D_F$	Strahldurchmesser im Fokus	[mm]
$dL$	infinitesimale Längenänderung	[mm]
$D_x, D_y, D_z$	Verbindungsdurchmesser in X-, Y-, Z-Richtung	[mm]
$d\varepsilon_w$	wahre Dehnungsänderung	[–]
$E_0$	Federsteifigkeit elastische Feder Maxwell-Element	[N/mm]
$E_{Fl}$	Flächenenergie	$\left[\frac{J}{mm^2}\right]$
$E_{GK}$	E-Modul der Glaskugel	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$E_{iso}$	isotroper Ersatz-E-Modul	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$E_S$	Ursprungs-Sekantenmodul	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$E_{S\_LS}$	Ursprungs-Sekantenmodul Lasersintermaterial	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$E_{S\_SG}$	Ursprungs-Sekantenmodul Spritzgussmaterial	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$E_{St}$	Streckenenergie	$\left[\frac{J}{mm}\right]$
$E_V$	Volumenenergiedichte	$\left[\frac{J}{mm^3}\right]$
$E_{ij}$	E-Modul des RVEs in den jeweiligen Raumrichtungen	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$E_m$	E-Modul der Faser	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]

$E_m$	E-Modul der Matrix	$[N/mm^2]; [MPa]$
$E_{rel}$	Federsteifigkeit elastische Feder Voigt-Element	$[N/mm]$
$E_t$	Zug-E-Modul aus dem einachsigen Zugversuch	$[N/mm^2]; [MPa]$
$E_{t_{P00}}$	Zug-E-Modul in Fließrichtung	$[N/mm^2]; [MPa]$
$E_{t_{P90\parallel}}$	Zug-E-Modul quer zur Fließrichtung in Plattenebene	$[N/mm^2]; [MPa]$
$E_{t_{P90\perp}}$	Zug-E-Modul quer zur Fließrichtung senkrecht zur Platteneb.	$[N/mm^2]; [MPa]$
$E_{t_X}, E_{t_Y}, E_{t_Z}$	Zug-E-Modul in X-, Y, Z-Richtung	$[N/mm^2]; [MPa]$
$E_{tc}$	Zug-Kriechmodul	$[N/mm^2]; [MPa]$
F, G, H, L, M, N	Hill Anisotropiekonstanten	$[-]$
$F_i$	im Zugversuch aktuell vorhandene Kraft	$[N]$
$H_i$	Verfestigungsparameter (Zusatzvariable)	$[-]$
$H_m$	spezifische Schmelzenthalpie	$[J]$
$h_{Scan}$	Spurversatz	$[mm]$
$K$	Kurzzeit-Bemessungskennwert	$[N/mm^2]; [MPa]$
$L$	Länge	$[mm]$
$L_{Scan}$	Scanlänge	$[mm]$
$L_i$	aktuell vorhandene Länge	$[mm]$
$L_o$	Ausgangslänge	$[mm]$
$M_B$	Bruchdrehmoment	$[Nm]$
$M_{B_{LS_{gemessen}}}$	gemessenes Bruchdrehmoment Laserinterbauteil	$[Nm]$
$M_{B_{SG_{berechnet_{MW}}}}$	berechnetes Bruchdrehmoment Mittelwert	$[Nm]$
$M_{B_{SG_{berechnet_{max}}}}$	berechnetes Bruchdrehmoment Maximum	$[Nm]$
$M_{B_{SG_{berechnet_{min}}}}$	berechnetes Bruchdrehmoment Minimum	$[Nm]$
$M_{B_{SG_{gemessen}}}$	gemessenes Bruchdrehmoment Spritzgießbauteil	$[Nm]$
$P_0$	optimale Laserleistung	$[W]$
$P_A$	absorbierter Teil der Laserleitung	$[W]$
$P_{B_{duktil}}$	Versagenspunkt spröder Werkstoff	$[-]$
$P_{B_{spröde}}$	Versagenspunkt duktiler Werkstoff	$[-]$
$P_L$	Laserleistung	$[W]$
$P_R$	reflektierter Teil der Laserleitung	$[W]$
$P_T$	transmittierter Teil der Laserleitung	$[W]$
$R_{ij}$	Fließspannungsverhältnisse	$[-]$

$P_{(z_{\text{Ein}})}$	Leistung in Abhängigkeit von der Eindringtiefe	[W]
$T_c^{\text{onset}}$	Onset-Temperatur der Kristallisation	[°C]
$T_m^{\text{onset}}$	Onset-Temperatur des Aufschmelzens	[°C]
$V_i$	aktuell vorhandenes Volumen	[mm <sup>3</sup> ]
$V_o$	Ausgangsvolumen	[mm <sup>3</sup> ]
$W_{\text{An}}$	Bindungsenergie	[kJ/mol]
$c_p$	spezifische Wärmekapazität	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}}\right]$
$f_\tau$	Schubspannungsfaktor	[–]
$f_{\tau_{\text{duktil}}}$	Schubspannungsfaktor für duktile Werkstoffe	[–]
$f_{\tau_{\text{spröde}}}$	Schubspannungsfaktor für spröde Werkstoffe	[–]
$p_{\text{amb}}$	Umgebungsdruck	[bar], [Pa]
$q_H$	Hill-Vergleichsspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$q_{vM}$	von Mises-Vergleichsspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$S$	Sicherheitsfaktor	[–]
$t_{\text{Bel}}$	Belastungsdauer	[s]
$T_{\text{Bg}}$	Glasübergangstemperaturbereich	[°C]
$T_{\text{Bm}}$	Schmelztemperaturbereich	[°C]
$T_{\text{Bz}}$	Zersetzungstemperaturbereich	[°C]
$T_c$	Kristallisationstemperatur	[°C]
$T_g$	Glasübergangstemperatur	[°C]
$T_m$	Schmelztemperatur	[°C]
$T_{\text{max}}$	Maximaltemperatur im Sinterprozess	[°C]
$T_{\text{Pulverbett}}$	Temperatur des Pulverbetts	[°C]
$T_{\text{Schmelz}}$	Schmelztemperatur	[°C]
$T_z$	Zersetzungstemperatur	[°C]
$v_{\text{Scan}}$	Scangeschwindigkeit	[mm/s]
$z_{\text{Ein}}$	Distanz Bauteiloberfläche zur betrachteten Eindringtiefe	[mm]
$z_S$	Schichtdicke	[mm]
$z_m$	Schmelztiefe	[mm]
$\alpha$	linearer Absorptionskoeffizient	[1/mm]
$\alpha_B$	Bruchwinkel des Mittelelements	[°]

$\alpha_{B\_SG\_simuliert}$	Bruchwinkel spritzgegossenen Mittelelements (simuliert)	[°]
$\dot{\gamma}$	Scherrate	[1/s]
$\Delta_H$	Schmelzenthalpie	[J/g]
$\Delta_{H\_100\%}$	Schmelzenthalpie einer 100-prozentig kristallinen Probe	[J/g]
$\Delta K_a$	Wellenversatz in axialer Richtung	[mm]
$\Delta K_r$	Wellenversatz in radialer Richtung	[mm]
$\Delta K_w$	winkliger Wellenversatz	[°]
$\Delta L$	Längenänderung	[mm]
$\Delta_{MB\_max}$	prozentualer Unterschied Bruchdrehmoment Maximum	[%]
$\Delta_{MB\_min}$	prozentualer Unterschied Bruchdrehmoment Minimum	[%]
$\Delta T$	Temperaturdifferenz	[K]
$\varepsilon_0$	spontaner elastischen Dehnungsanteil	[%]
$\varepsilon_B$	Bruchdehnung	[%]
$\varepsilon_{el}$	elastischer Dehnungsanteil	[%]
$\varepsilon_{ges}$	Gesamtdehnung	[%]
$\varepsilon_{ges}(t)$	zeitabhängige Gesamtdehnung	[%]
$\varepsilon_M$	Dehnung bei Zugfestigkeit	[%]
$\varepsilon_{M\_P00}$	Dehnung bei Zugfestigkeit in Fließrichtung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\varepsilon_{M\_P90\parallel}$	Dehn. b. Zugf. quer zur Fließrichtung in Plattenebene	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\varepsilon_{M\_P90\perp}$	Dehn. b. Zugf. quer zur Fließr. u. senkrecht zur Platteneb.	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\varepsilon_{M\_X}, \varepsilon_{M\_Y}, \varepsilon_{M\_Z}$	Dehnung bei Zugfestigkeit in X-, Y-, Z-Richtung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\varepsilon_{pl}$	plastischer Dehnungsanteil	[%]
$\varepsilon_{rel}(t)$	zeitabhängiger relaxierender Dehnungsanteil	[%]
$\varepsilon_t$	technische Dehnung	[%]
$\varepsilon_{v(t)}$	zeitabhängiger viskoser Dehnungsanteil	[%]
$\varepsilon_w$	wahre Dehnung	[%]
$\varepsilon_Y$	Streckdehnung	[%]
$\eta$	Viskosität	[Pa s]
$\eta_0$	Dämpferviskosität newtonscher Dämpfer Maxwell-Element	[Pa s]
$\eta_0$	Nullviskosität	[Pa s]
$\eta_{rel}$	Dämpferviskosität zeitabhängiger Dämpfer Voigt-Element	[Pa s]

$\theta$	Temperatur	[°C]
$\nu$	Poisson-Konstante oder Querkontraktionszahl	[–]
$\rho$	Dichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]
$\rho_{Faser}$	Dichte Faser	[kg/dm <sup>3</sup> ]
$\rho_{Matrix}$	Dichte Matrix	[kg/dm <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Spannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_B$	Bruchspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{ij}$	Spannung in der jeweiligen Richtung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{iy}^y$	Fließspannungen in der jeweiligen Richtung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_M$	Zugfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{M\_P00}$	Zugfestigkeit in Fließrichtung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{M\_P90\parallel}$	Zugfestigkeit quer zur Fließrichtung in Plattenebene	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{M\_P90\perp}$	Zugfestigkeit quer zur Fließrichtung senkrecht zur Platteneb.	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{M\_X}, \sigma_{M\_Y}, \sigma_{M\_Z}$	Zugfestigkeit in X-, Y-, Z-Richtung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_t$	technische Spannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{V\ Hill}$	Hill-Vergleichsspannung allgemeine Form	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{V\ Mises\ Haupt}$	von Mises-Vergleichssp. im Hauptnormalspannungsraum	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{V\ Mises\ allg}$	von Mises-Vergleichsspannung allgemeine Form	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{Vmax}$	maximale Vergleichsspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{Vmax\_Orig}$	maximale Vergleichsspannung Originalgeometrie	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{Vmax\_STL}$	maximale Vergleichsspannung STL-Modell	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{Vmax\_Slicen}$	maximale Vergleichsspannung Schichtmodell	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{vorhanden}$	vorhandene Spannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_w$	wahre Spannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_Y$	Streckspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\sigma_{zulässig}$	zulässige Spannung (Dimensionierungskennwert)	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\tau$	Relaxationszeit	[s]
$\tau_y$	Schub-Fließspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [MPa]
$\Phi$	Faservolumenanteil	[–]
$\Psi$	Fasergewichtsanteil	[–]

### 10.3 Anhang zu Kapitel 5

#### 10.3.1 Anhang zu Abschnitt 5.1

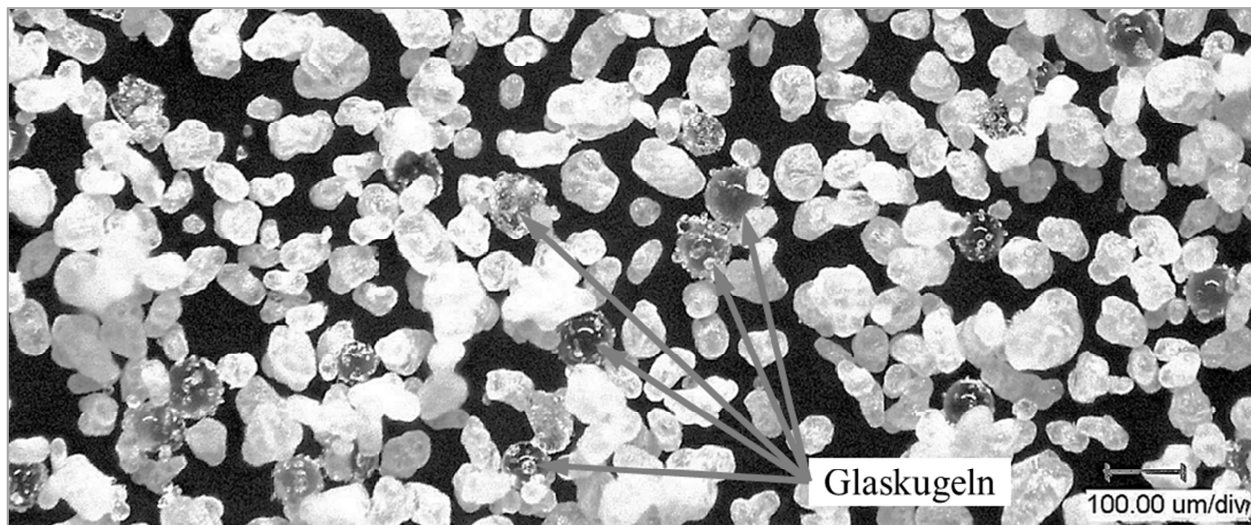


Abbildung 10.1: Mikroskopaufnahme des glaskugelgefüllten Sinterpulvers

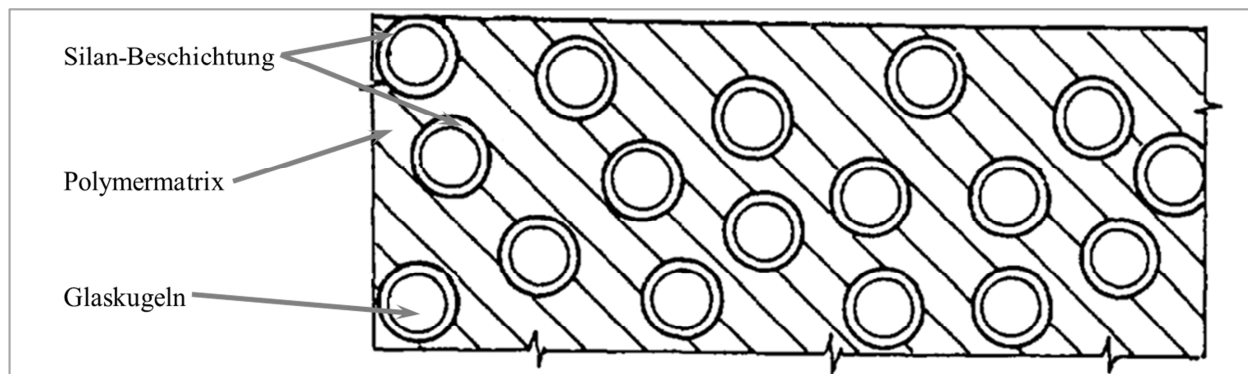


Abbildung 10.2: Glaskugeln mit Silan-Beschichtung als Haftvermittler in einer Polymermatrix gemäß [151]

Tabelle 10.1: Datenblattkennwerte und Versuchsergebnisse der luftfeuchten Probestäbe im direkten Vergleich

Materialbezeichnung			PA 2200 Balance 1.0				PA 3200 GF			
Material			PA 12				PA 12 GK 40			
Eigenschaft			ungefüllt				glasgefüllt			
Farbe			weißlich				weißlich			
			Datenblatt	Versuch		proz. Abwei- chung zw. Datenblatt und Versuch	Datenblatt	Versuch		proz. Abwei- chung zw. Datenblatt und Versuch
Probestab			k.A.	1 BA 2 mm			k.A.	1 BA 2 mm		
Konditionierungszustand			k.A.	luftfeucht			k.A.	luftfeucht		
Prüfgeschwindigkeit E-Modul			k.A.	1 mm/min			k.A.	1 mm/min		
Prüfgeschw. Rest der Prüfung			k.A.	50 mm/min			k.A.	50 mm/min		
Kennwert		Einheit	Kennwert	Messwert	Standard- abweichung		Kennwert	Messwert	Standard- abweichung	
E-Modul	X	N/mm²	1650	1493	51,19	-9,5 %	3200	1768	8,39	-44,8 %
	Y	N/mm²	1650	1558	116,8	-5,6 %	3200	1782	18,93	-44,3 %
	Z	N/mm²	1650	1530	67,63	-7,3 %	2500	1595	49,32	-36,2 %
Zugfestigkeit	X	N/mm²	48	44,6	0,7	-7,1 %	51	26,6	0,47	-47,8 %
	Y	N/mm²	48	45,5	0,63	-5,2 %	51	26,5	0,21	-48,0 %
	Z	N/mm²	42	22,9	4,46	-45,5 %	47	23,7	0,97	-49,6 %
Bruchdehnung	X	%	18	11,99	1,296	-33,4 %	9	22,238	2,386	147,1 %
	Y	%	18	13,494	0,952	-25,0 %	9	24,797	3,18	175,5 %
	Z	%	4	1,56	0,419	-61,0 %	5,5	17,812	6,252	223,9 %
Quelle:			EOS	eigene Untersuchungen			EOS	eigene Untersuchungen		

### 10.3.2 Anhang zu Abschnitt 5.2

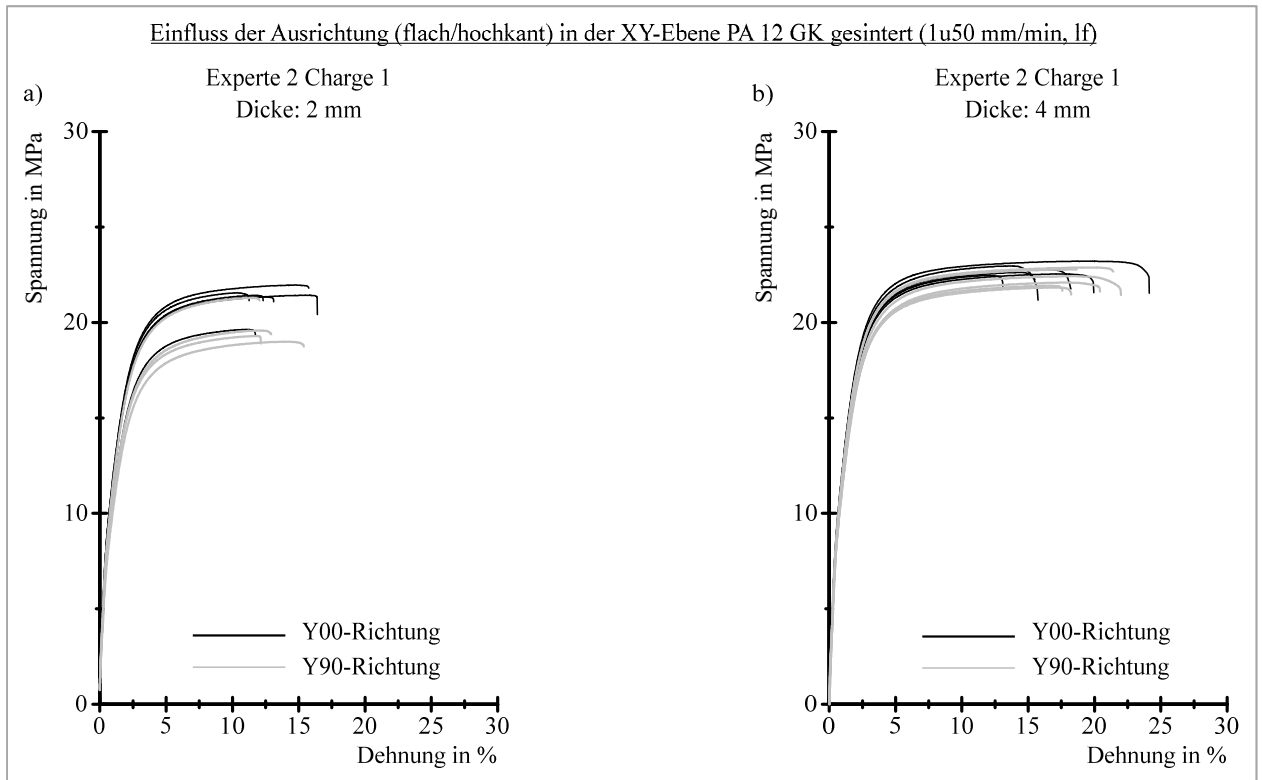


Abbildung 10.3: Einfluss des Winkels zwischen der Oberfläche des Probestabes und der Bauplattform;  
Diagramm a) Spannungs-Dehnungs-Kurven der 2 mm dicken Y00- und Y90-Probestäbe;  
Diagramm b) Spannungs-Dehnungs-Kurven der 4 mm dicken Y00- und Y90-Probestäbe

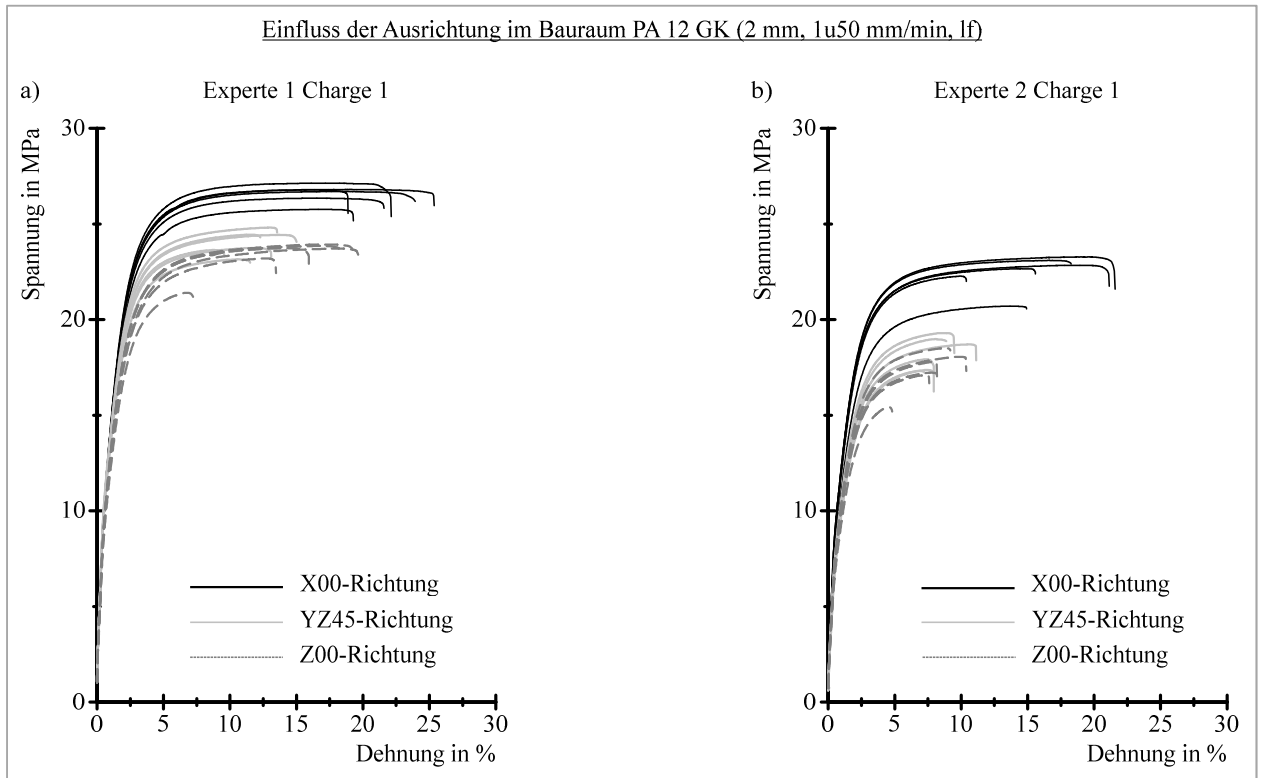


Abbildung 10.4: Versuchsergebnisse in X-, Z- und YZ45-Richtung der 2 mm dicken Sinterproben aus P4001-GF und einer Prüfgeschwindigkeit von 1 und 50 mm/min



### 10.3.3 Anhang zu Abschnitt 5.3

Tabelle 10.2: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Wasseraufnahme auf den Zug-E-Modul in X-Richtung

Einfluss der Wasseraufnahme					Zug-E-Modul				
Aus- richtung	Dicke	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	sinterfrisch	Standard- abweichung	luftfeucht	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
X	2	1 u. 50	PA 12	SLS	1757,9	101,1	1493,3	51,2	-15,1 %
X	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3180,5	48,3	1752,8	17,9	-44,9 %
X	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3272,7	27,2	1850,5	13,0	-43,5 %
X	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3197,7	77,7	1768,0	8,4	-44,7 %
X	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2913,3	193,6	1661,7	80,3	-43,0 %
X	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3253,3	32,5	1864,0	21,7	-42,7 %
X	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2999,2	324,3	1784,7	90,5	-40,5 %

Tabelle 10.3: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Wasseraufnahme auf den Zug-E-Modul in Y-Richtung

Einfluss der Wasseraufnahme					Zug-E-Modul				
Aus- richtung	Dicke	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	sinterfrisch	Standard- abweichung	luftfeucht	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
Y	2	1 u. 50	PA 12	SLS	1882,4	54,5	1557,8	116,8	-17,2 %
Y	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3277,9	55,5	1798,9	22,3	-45,1 %
Y	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3071,7	409,7	1497,3	83,1	-51,3 %
Y	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3339,5	47,5	1909,1	22,3	-42,8 %
Y	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3045,0	243,3	1645,1	91,3	-46,0 %
Y	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3262,2	40,5	1781,8	18,9	-45,4 %
Y	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2657,0	174,2	1545,2	52,5	-41,8 %
Y	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3365,9	37,8	1885,9	25,1	-44,0 %
Y	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3017,8	140,1	1764,4	78,9	-41,5 %

Tabelle 10.4: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Wasseraufnahme auf den Zug-E-Modul in Z-Richtung

Einfluss der Wasseraufnahme					Zug-E-Modul				
Aus- richtung	Dicke	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	sinterfrisch	Standard- abweichung	luftfeucht	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
Z	2	1 u. 50	PA 12	SLS	1814,4	83,5	1529,7	67,6	-15,7 %
Z	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3214,2	30,2	1546,7	28,1	-51,9 %
Z	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	2320,6	299,0	1310,1	77,7	-43,5 %
Z	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3365,7	55,9	1788,5	6,9	-46,9 %
Z	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	2776,5	154,7	1591,7	127,3	-42,7 %
Z	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3185,5	23,1	1594,9	22,3	-49,9 %
Z	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2214,3	271,2	1312,9	31,2	-40,7 %
Z	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3419,2	48,0	1767,7	8,2	-48,3 %
Z	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2836,4	101,0	1554,6	79,4	-45,2 %

Tabelle 10.5: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Wasseraufnahme auf den Zug-E-Modul der spritzgegossenen Probestäbe

Einfluss der Wasseraufnahme					Zug-E-Modul				
Aus- richtung	Dicke	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	spritzfrisch	Standard- abweichung	luftfeucht	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
DI	4	1 u. 5	PA 12	SG	1373,1	13,2	939,3	25,4	-31,6 %
DI	4	1 u. 50	PA 12	SG	1376,7	22,4	903,5	12,2	-34,4 %
DI	4	1 u. 5	PA 12 GK 30	SG	2063,2	30,2	1409,7	19,2	-31,7 %
DI	4	1 u. 50	PA 12 GK 30	SG	2075,0	27,6	1417,5	7,6	-31,7 %
DI	4	1 u. 5	PA 12 GK 50	SG	2957,1	19,9	2405,1	13,8	-18,7 %
DI	4	1 u. 50	PA 12 GK 50	SG	2973,3	24,9	2358,8	22,7	-20,7 %

Tabelle 10.6: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Wasseraufnahme auf die Zugfestigkeit in X-Richtung

Einfluss der Wasseraufnahme					Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Dicke	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	sinterfrisch	Standard- abweichung	luftfeucht	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
X	2	1 u. 50	PA 12	SLS	48,7	0,6	44,6	0,7	-8,4 %
X	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	42,8	0,6	24,9	0,4	-41,8 %
X	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	46,5	0,3	26,8	0,2	-42,4 %
X	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	46,8	0,6	26,6	0,5	-43,2 %
X	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	38,2	2,5	22,8	0,4	-40,3 %
X	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	50,2	0,3	28,0	0,2	-44,2 %
X	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	40,9	3,1	23,4	0,3	-42,8 %

Tabelle 10.7: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Wasseraufnahme auf die Zugfestigkeit in Y-Richtung

Einfluss der Wasseraufnahme					Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Dicke	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	sinterfrisch	Standard- abweichung	luftfeucht	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
Y	2	1 u. 50	PA 12	SLS	49,3	0,3	45,5	0,6	-7,8 %
Y	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	44,2	0,4	25,7	0,2	-41,9 %
Y	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	35,1	2,1	20,0	0,9	-43,0 %
Y	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	48,5	0,3	27,6	0,2	-43,1 %
Y	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	36,4	2,1	21,3	0,6	-41,5 %
Y	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	48,6	0,4	26,5	0,2	-45,5 %
Y	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	36,1	2,4	21,5	0,3	-40,4 %
Y	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	52,5	0,1	28,3	0,3	-46,1 %
Y	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	40,4	3,2	22,8	0,3	-43,6 %

Tabelle 10.8: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Wasseraufnahme auf die Zugfestigkeit in Z-Richtung

Einfluss der Wasseraufnahme					Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Dicke	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	sinterfrisch	Standard- abweichung	luftfeucht	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
Z	2	1 u. 50	PA 12	SLS	29,1	4,4	22,9	4,5	-21,2 %
Z	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	40,7	0,3	22,8	0,3	-44,0 %
Z	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	20,5	3,8	16,5	0,8	-19,5 %
Z	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	44,0	0,7	23,5	0,2	-46,6 %
Z	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	31,9	0,8	18,8	0,1	-41,1 %
Z	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	44,1	1,1	23,7	0,3	-46,3 %
Z	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	23,0	4,2	17,7	0,6	-23,0 %
Z	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	47,9	0,3	24,3	0,3	-49,3 %
Z	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	34,7	1,7	19,8	0,4	-42,9 %

Tabelle 10.9: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Wasseraufnahme auf die Zugfestigkeit der spritzgegossenen Probestäbe

Einfluss der Wasseraufnahme					Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Dicke	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	spritzfrisch	Standard- abweichung	luftfeucht	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
DI	4	1 u. 5	PA 12	SG	38,8	0,3	36,6	0,3	-5,7 %
DI	4	1 u. 50	PA 12	SG	42,3	0,6	38,9	0,3	-8,0 %
DI	4	1 u. 5	PA 12 GK 30	SG	44,3	0,5	40,0	0,3	-9,7 %
DI	4	1 u. 50	PA 12 GK 30	SG	47,7	0,5	42,9	0,2	-10,0 %
DI	4	1 u. 5	PA 12 GK 50	SG	47,6	0,2	44,7	0,1	-6,1 %
DI	4	1 u. 50	PA 12 GK 50	SG	50,9	0,2	47,1	0,3	-7,4 %

Tabelle 10.10: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Wasseraufnahme auf die Dehnung bei Zugfestigkeit in X-Richtung

Einfluss der Wasseraufnahme					Dehnung bei Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Dicke	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	sinterfrisch	Standard- abweichung	luftfeucht	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	mm/min			%	%	%	%	
X	2	1 u. 50	PA 12	SLS	9,17	1,01	10,96	0,61	19,6 %
X	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3,06	0,04	21,88	1,86	615,8 %
X	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3,42	0,03	24,34	1,41	611,1 %
X	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3,02	0,10	17,27	1,15	472,0 %
X	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3,02	0,09	15,94	3,93	428,2 %
X	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3,35	0,04	18,82	0,52	462,7 %
X	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3,34	0,32	18,41	0,91	451,5 %

Tabelle 10.11: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Wasseraufnahme auf die Dehnung bei Zugfestigkeit in Y-Richtung

Einfluss der Wasseraufnahme					Dehnung bei Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Dicke	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	sinterfrisch	Standard- abweichung	luftfeucht	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	mm/min			%	%	%	%	
Y	2	1 u. 50	PA 12	SLS	9,21	0,39	11,65	0,43	26,6 %
Y	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3,07	0,05	22,60	1,94	637,0 %
Y	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3,15	0,24	15,30	2,51	386,6 %
Y	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3,63	0,07	25,22	0,62	594,0 %
Y	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3,66	0,23	19,82	3,13	440,8 %
Y	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3,02	0,08	18,01	1,13	496,7 %
Y	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2,81	0,09	12,96	2,26	361,3 %
Y	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3,45	0,06	16,96	1,19	392,2 %
Y	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3,16	0,09	15,54	2,67	392,1 %

Tabelle 10.12: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Wasseraufnahme auf die Dehnung bei Zugfestigkeit in Z-Richtung

Einfluss der Wasseraufnahme					Dehnung bei Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Dicke	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	sinterfrisch	Standard- abweichung	luftfeucht	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	mm/min			%	%	%	%	
Z	2	1 u. 50	PA 12	SLS	1,79	0,43	1,56	0,42	-12,9 %
Z	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	2,48	0,04	16,95	2,58	582,6 %
Z	2	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	1,77	0,70	9,15	1,52	416,2 %
Z	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	2,70	0,21	18,55	3,18	586,8 %
Z	4	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	2,27	0,25	9,36	1,25	312,1 %
Z	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2,32	0,19	15,86	2,22	584,0 %
Z	2	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1,49	0,16	8,30	1,03	458,7 %
Z	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2,71	0,02	15,67	1,43	477,7 %
Z	4	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2,17	0,28	8,29	0,99	282,2 %

Tabelle 10.13: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Wasseraufnahme auf die Dehn. b. Zugf. der spritzgegossenen Probestäbe

Einfluss der Wasseraufnahme					Dehnung bei Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Dicke	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	spritzfrisch	Standard- abweichung	luftfeucht	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	mm/min			%	%	%	%	
DI	4	1 u. 5	PA 12	SG	16,045	0,400	18,062	0,525	12,6 %
DI	4	1 u. 50	PA 12	SG	6,919	1,865	16,008	0,198	131,4 %
DI	4	1 u. 5	PA 12 GK 30	SG	13,559	0,881	15,390	0,278	13,5 %
DI	4	1 u. 50	PA 12 GK 30	SG	8,208	0,452	13,033	0,162	58,8 %
DI	4	1 u. 5	PA 12 GK 50	SG	12,282	0,326	12,685	0,301	3,3 %
DI	4	1 u. 50	PA 12 GK 50	SG	7,802	0,257	10,520	0,124	34,8 %

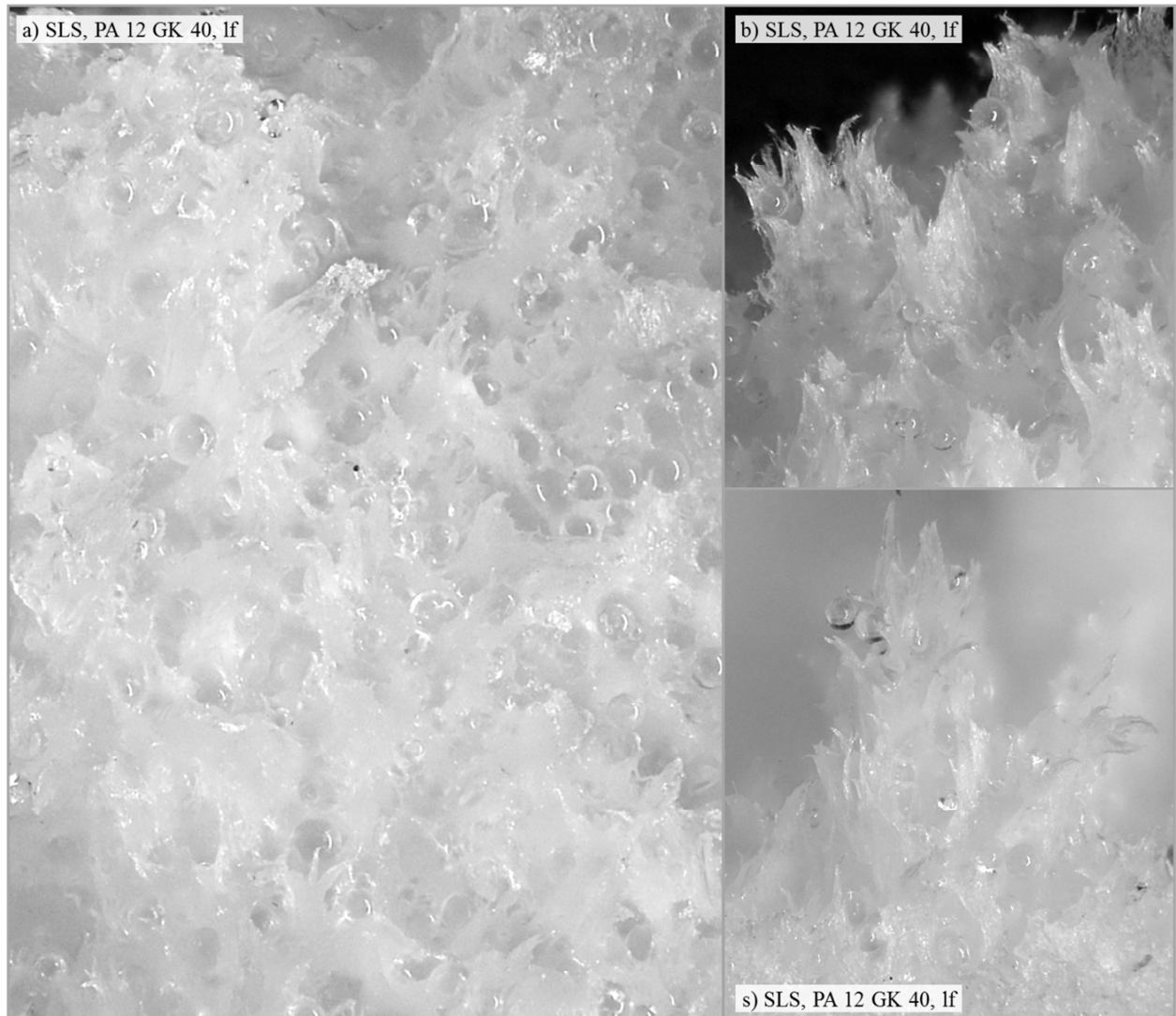


Abbildung 10.5: Detailaufnahmen von Bruchflächen von lasergesinterten Probestäben aus PA 12 GK 40; die Probestäbe wurden im luftfeuchten Zustand untersucht

### 10.3.4 Anhang zu Abschnitt 5.4

Tabelle 10.14: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf den Zug-E-Modul in X-Richtung

<u>Einfluss der Prüfgeschwindigkeit</u>					Zug-E-Modul				
Ausrichtung	Dicke	Konditionierungszustand	Material	Verarbeitung	V <sub>Prüf</sub> = 1 u. 5 mm/min	Standardabweichung	V <sub>Prüf</sub> = 1 u. 50 mm/min	Standardabweichung	proz. Veränderung
-	mm	-			MPa	MPa	MPa	MPa	
X	2	lf	PA 12	SLS	1471,1	62,6	1493,3	51,2	1,5 %
X	4	lf	PA 12	SLS	1510,7	49,1	1501,0	45,7	-0,6 %
X	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	3180,5	48,3	3197,7	77,7	0,5 %
X	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	3272,7	27,2	3253,3	32,5	-0,6 %
X	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	1752,8	17,9	1768,0	8,4	0,9 %
X	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	1850,5	13,0	1864,0	21,7	0,7 %
XY45	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	2012,9	29,9	2020,3	9,8	0,4 %

Tabelle 10.15: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf den Zug-E-Modul in Y-Richtung

<u>Einfluss der Prüfgeschwindigkeit</u>					Zug-E-Modul				
Ausrichtung	Dicke	Konditionierungszustand	Material	Verarbeitung	V <sub>Prüf</sub> = 1 u. 5 mm/min	Standardabweichung	V <sub>Prüf</sub> = 1 u. 50 mm/min	Standardabweichung	proz. Veränderung
-	mm	-			MPa	MPa	MPa	MPa	
Y	2	lf	PA 12	SLS	1479,2	57,2	1557,8	116,8	5,3 %
Y	4	lf	PA 12	SLS	1536,4	39,2	1522,9	37,4	-0,9 %
Y	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	3277,9	55,5	3262,2	40,5	-0,5 %
Y	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	3071,7	409,7	2657,0	174,2	-13,5 %
Y	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	3339,5	47,5	3365,9	37,8	0,8 %
Y	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	3045,0	243,3	3017,8	140,1	-0,9 %
Y	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	1798,9	22,3	1781,8	18,9	-1,0 %
Y	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	1497,3	83,1	1545,2	52,5	3,2 %
Y	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	1909,1	22,3	1885,9	25,1	-1,2 %
Y	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	1645,1	91,3	1764,4	78,9	7,3 %
YZ45	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	1819,8	30,2	1822,0	29,3	0,1 %

Tabelle 10.16: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf den Zug-E-Modul in Z-Richtung

<b><u>Einfluss der Prüfgeschwindigkeit</u></b>					<b>Zug-E-Modul</b>				
Aus- richtung	Dicke	Kondi- tion- ierungs- zustand	Material	Verar- beitung	$v_{\text{Prüf}} =$ 1 u. 5 mm/min	Standard- abweichung	$v_{\text{Prüf}} =$ 1 u. 50 mm/min	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	-			MPa	MPa	MPa	MPa	
Z	2	lf	PA 12	SLS	1529,5	55,7	1529,7	67,6	0,0 %
Z	4	lf	PA 12	SLS	1518,3	6,1	1406,7	151,5	-7,4 %
Z	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	3214,2	30,2	3185,5	23,1	-0,9 %
Z	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	2320,6	299,0	2214,3	271,2	-4,6 %
Z	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	3365,7	55,9	3419,2	48,0	1,6 %
Z	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	2776,5	154,7	2836,4	101,0	2,2 %
Z	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	1546,7	28,1	1594,9	22,3	3,1 %
Z	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	1310,1	77,7	1312,9	31,2	0,2 %
Z	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	1788,5	6,9	1767,7	8,2	-1,2 %
Z	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	1591,7	127,3	1554,6	79,4	-2,3 %
XZ45	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	1907,6	39,3	1904,9	33,5	-0,1 %
RD45	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	1920,4	15,5	1923,4	17,5	0,2 %

Tabelle 10.17: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf den Zug-E-Modul der spritzgegossenen Probestäbe

<b><u>Einfluss der Prüfgeschwindigkeit</u></b>					<b>Zug-E-Modul</b>				
Aus- richtung	Dicke	Kondi- tion- ierungs- zustand	Material	Verar- beitung	$v_{\text{Prüf}} =$ 1 u. 5 mm/min	Standard- abweichung	$v_{\text{Prüf}} =$ 1 u. 50 mm/min	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	-			MPa	MPa	MPa	MPa	
DI	4	sf	PA 12	SG	1373,1	13,2	1376,7	22,4	0,3 %
DI	4	lf	PA 12	SG	939,3	25,4	903,5	12,2	-3,8 %
DI	4	sf	PA 12 GK 30	SG	2063,2	30,2	2075,0	27,6	0,6 %
DI	4	lf	PA 12 GK 30	SG	1409,7	19,2	1417,5	7,6	0,6 %
P00	4	lf	PA 12 GK 30	SG	1424,1	52,7	1368,6	63,1	-3,9 %
P90	4	lf	PA 12 GK 30	SG	1496,0	33,3	1510,8	25,3	1,0 %
P00	2	lf	PA 12 GK 30	SG	1325,7	59,5	1343,6	13,7	1,3 %
P90	2	lf	PA 12 GK 30	SG	1375,7	26,8	1369,4	40,0	-0,5 %
DI	4	sf	PA 12 GK 50	SG	2957,1	19,9	2973,3	14,9	0,5 %
DI	4	lf	PA 12 GK 50	SG	2405,1	13,8	2358,8	22,7	-1,9 %
P00	4	lf	PA 12 GK 50	SG	2517,9	35,3	2469,3	76,0	-1,9 %
P90	4	lf	PA 12 GK 50	SG	2626,1	56,0	2533,5	156,1	-3,5 %
P00	2	lf	PA 12 GK 50	SG	2387,5	76,8	2372,4	109,5	-0,6 %
P90	2	lf	PA 12 GK 50	SG	2651,2	56,2	2670,0	34,0	0,7 %

Tabelle 10.18: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Zugfestigkeit in X-Richtung

Einfluss der Prüfgeschwindigkeit					Zugfestigkeit				
Ausrichtung	Dicke	Konditionierungszustand	Material	Verarbeitung	v <sub>Prüf</sub> = 1 u. 5 mm/min	Standardabweichung	v <sub>Prüf</sub> = 1 u. 50 mm/min	Standardabweichung	proz. Veränderung
-	mm	-			MPa	MPa	MPa	MPa	
X	2	lf	PA 12	SLS	41,9	0,7	44,6	0,7	6,4 %
X	4	lf	PA 12	SLS	42,8	0,4	45,2	0,6	5,7 %
X	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	42,8	0,6	46,8	0,6	9,3 %
X	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	46,5	0,3	50,2	0,3	8,0 %
X	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	24,9	0,4	26,6	0,5	6,8 %
X	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	26,8	0,2	28,0	0,2	4,5 %
XY45	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	24,8	0,2	26,0	0,2	4,8 %

Tabelle 10.19: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Zugfestigkeit in Y-Richtung

Einfluss der Prüfgeschwindigkeit					Zugfestigkeit				
Ausrichtung	Dicke	Konditionierungszustand	Material	Verarbeitung	v <sub>Prüf</sub> = 1 u. 5 mm/min	Standardabweichung	v <sub>Prüf</sub> = 1 u. 50 mm/min	Standardabweichung	proz. Veränderung
-	mm	-			MPa	MPa	MPa	MPa	
Y	2	lf	PA 12	SLS	42,2	0,8	45,5	0,6	7,7 %
Y	4	lf	PA 12	SLS	43,2	0,3	45,6	0,3	5,7 %
Y	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	44,2	0,4	48,6	0,4	10,0 %
Y	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	35,1	2,1	36,1	2,4	2,7 %
Y	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	48,5	0,3	52,5	0,1	8,2 %
Y	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	36,4	2,1	40,4	3,2	11,0 %
Y	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	25,7	0,2	26,5	0,2	3,1 %
Y	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	20,0	0,9	21,5	0,3	7,5 %
Y	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	27,6	0,2	28,3	0,3	2,5 %
Y	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	21,3	0,6	22,8	0,3	7,0 %
YZ45	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	23,0	0,5	24,0	0,6	4,7 %

Tabelle 10.20: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Zugfestigkeit in Z-Richtung

Einfluss der Prüfgeschwindigkeit					Zugfestigkeit				
Ausrichtung	Dicke	Konditionierungszustand	Material	Verarbeitung	v <sub>Prüf</sub> = 1 u. 5 mm/min	Standardabweichung	v <sub>Prüf</sub> = 1 u. 50 mm/min	Standardabweichung	proz. Veränderung
-	mm	-			MPa	MPa	MPa	MPa	
Z	2	lf	PA 12	SLS	24,9	3,3	22,9	4,5	-7,8 %
Z	4	lf	PA 12	SLS	18,2	4,2	17,1	3,5	-5,9 %
Z	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	40,7	0,3	44,1	1,1	8,4 %
Z	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	20,5	3,8	23,0	4,2	12,2 %
Z	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	44,0	0,7	47,9	0,3	8,9 %
Z	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	31,9	0,8	34,7	1,7	8,8 %
Z	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	22,8	0,3	23,7	0,3	3,9 %
Z	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	16,5	0,8	17,7	0,6	7,3 %
Z	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	23,5	0,2	24,3	0,3	3,4 %
Z	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	18,8	0,1	19,8	0,4	5,3 %
XZ45	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	23,6	0,2	24,8	0,2	5,0 %
RD45	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	23,6	0,3	24,6	0,4	4,5 %

Tabelle 10.21: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Zugfestigkeit der spritzgegossenen Probestäbe

Einfluss der Prüfgeschwindigkeit					Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Dicke	Kondi- tion- ierungs- zustand	Material	Verar- beitung	$v_{\text{Prüf}} =$ 1 u. 5 mm/min	Standard- abweichung	$v_{\text{Prüf}} =$ 1 u. 50 mm/min	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	-			MPa	MPa	MPa	MPa	
DI	4	sf	PA 12	SG	38,8	0,3	42,3	0,6	8,9 %
DI	4	lf	PA 12	SG	36,6	0,3	38,9	0,3	6,2 %
DI	4	sf	PA 12 GK 30	SG	44,3	0,5	47,7	0,5	7,7 %
DI	4	lf	PA 12 GK 30	SG	40,0	0,3	42,9	0,2	7,4 %
P00	4	lf	PA 12 GK 30	SG	39,7	0,1	43,2	0,2	8,9 %
P90	4	lf	PA 12 GK 30	SG	40,2	0,1	43,7	0,3	8,8 %
P00	2	lf	PA 12 GK 30	SG	38,0	0,2	41,9	0,3	10,3 %
P90	2	lf	PA 12 GK 30	SG	37,9	0,4	41,6	40,0	9,8 %
DI	4	sf	PA 12 GK 50	SG	47,6	0,2	50,9	0,2	6,9 %
DI	4	lf	PA 12 GK 50	SG	44,7	0,1	47,1	0,3	5,4 %
P00	4	lf	PA 12 GK 50	SG	45,0	0,4	48,7	0,2	8,2 %
P90	4	lf	PA 12 GK 50	SG	45,2	0,2	49,0	0,4	8,3 %
P00	2	lf	PA 12 GK 50	SG	43,5	0,4	46,9	0,3	7,8 %
P90	2	lf	PA 12 GK 50	SG	43,7	0,2	48,7	0,2	11,5 %

Tabelle 10.22: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Dehnung bei Zugfestigkeit in X-Richtung

Einfluss der Prüfgeschwindigkeit					Dehnung bei Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Dicke	Kondi- tion- ierungs- zustand	Material	Verar- beitung	$v_{\text{Prüf}} =$ 1 u. 5 mm/min	Standard- abweichung	$v_{\text{Prüf}} =$ 1 u. 50 mm/min	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	-			%	%	%	%	
X	2	lf	PA 12	SLS	13,39	1,10	10,96	0,61	-18,2 %
X	4	lf	PA 12	SLS	14,51	0,37	12,10	0,15	-16,6 %
X	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	3,06	0,04	3,02	0,10	-1,2 %
X	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	3,42	0,03	3,35	0,04	-2,3 %
X	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	21,88	1,86	17,27	1,15	-21,1 %
X	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	24,34	1,41	18,82	0,52	-22,7 %
XY45	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	15,60	1,37	13,25	1,60	-15,1 %



Tabelle 10.23: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Dehnung bei Zugfestigkeit in Y-Richtung

Einfluss der Prüfgeschwindigkeit					Dehnung bei Zugfestigkeit				
Ausrichtung	Dicke	Konditionierungszustand	Material	Verarbeitung	v <sub>Prüf</sub> = 1 u. 5 mm/min	Standardabweichung	v <sub>Prüf</sub> = 1 u. 50 mm/min	Standardabweichung	proz. Veränderung
-	mm	-			%	%	%	%	
Y	2	lf	PA 12	SLS	13,89	0,62	11,65	0,43	-16,1 %
Y	4	lf	PA 12	SLS	13,69	2,12	11,18	0,45	-18,3 %
Y	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	3,07	0,05	3,02	0,08	-1,6 %
Y	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	3,15	0,24	2,81	0,09	-10,7 %
Y	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	3,63	0,07	3,45	0,06	-5,2 %
Y	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	3,66	0,23	3,16	0,09	-13,8 %
Y	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	22,60	1,94	18,01	1,13	-20,3 %
Y	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	15,30	2,51	12,96	2,26	-15,3 %
Y	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	25,22	0,62	16,96	1,19	-32,8 %
Y	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	19,82	3,13	15,54	2,67	-21,6 %
YZ45	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	12,46	2,07	11,58	1,75	-7,1 %

Tabelle 10.24: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Dehnung bei Zugfestigkeit in Z-Richtung

Einfluss der Prüfgeschwindigkeit					Dehnung bei Zugfestigkeit				
Ausrichtung	Dicke	Konditionierungszustand	Material	Verarbeitung	v <sub>Prüf</sub> = 1 u. 5 mm/min	Standardabweichung	v <sub>Prüf</sub> = 1 u. 50 mm/min	Standardabweichung	proz. Veränderung
-	mm	-			%	%	%	%	
Z	2	lf	PA 12	SLS	2,07	0,47	1,56	0,42	-24,5 %
Z	4	lf	PA 12	SLS	1,33	0,36	1,22	0,19	-8,3 %
Z	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	2,48	0,04	2,32	0,19	-6,6 %
Z	2	sf	PA 12 GK 40	SLS	1,77	0,70	1,49	0,16	-16,2 %
Z	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	2,70	0,21	2,71	0,02	0,4 %
Z	4	sf	PA 12 GK 40	SLS	2,27	0,25	2,17	0,28	-4,5 %
Z	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	16,95	2,58	15,86	2,22	-6,4 %
Z	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	9,15	1,52	8,30	1,03	-9,4 %
Z	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	18,55	3,18	15,67	1,43	-15,5 %
Z	4	lf	PA 12 GK 40	SLS	9,34	1,25	8,29	0,99	-11,2 %
XZ45	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	13,91	3,50	13,16	3,95	-5,4 %
RD45	2	lf	PA 12 GK 40	SLS	15,15	1,42	14,21	1,70	-6,2 %

Tabelle 10.25: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Dehn. b. Zugf. der spritzgegossenen Probestäbe

<b>Einfluss der Prüfgeschwindigkeit</b>					<b>Dehnung bei Zugfestigkeit</b>				
Aus- richtung	Dicke	Kondi- tion- ierungs- zustand	Material	Verar- beitung	$v_{\text{Prüf}} =$ 1 u. 5 mm/min	Standard- abweichung	$v_{\text{Prüf}} =$ 1 u. 50 mm/min	Standard- abweichung	proz. Verän- derung
-	mm	-			%	%	%	%	
DI	4	sf	PA 12	SG	16,0	0,4	6,9	1,9	-56,9 %
DI	4	lf	PA 12	SG	18,1	0,5	16,0	0,2	-11,4 %
DI	4	sf	PA 12 GK 30	SG	13,6	0,9	8,2	0,5	-39,5 %
DI	4	lf	PA 12 GK 30	SG	15,4	0,3	13,0	0,2	-15,3 %
P00	4	lf	PA 12 GK 30	SG	14,8	0,3	12,5	0,1	-15,8 %
P90	4	lf	PA 12 GK 30	SG	14,6	0,1	12,2	0,3	-15,9 %
P00	2	lf	PA 12 GK 30	SG	15,3	0,3	12,5	0,2	-18,3 %
P90	2	lf	PA 12 GK 30	SG	14,7	0,4	11,9	0,2	-19,1 %
DI	4	sf	PA 12 GK 50	SG	12,3	0,3	7,8	0,3	-36,5 %
DI	4	lf	PA 12 GK 50	SG	12,7	0,3	10,5	0,1	-17,1 %
P00	4	lf	PA 12 GK 50	SG	11,0	0,8	9,0	0,3	-18,4 %
P90	4	lf	PA 12 GK 50	SG	11,0	0,3	8,6	0,3	-21,6 %
P00	2	lf	PA 12 GK 50	SG	12,1	0,5	9,9	0,4	-18,0 %
P90	2	lf	PA 12 GK 50	SG	9,5	0,3	7,2	0,1	-24,3 %

### 10.3.5 Anhang zu Abschnitt 5.5

Tabelle 10.26: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Dicke des Probestabs auf den Zug-E-Modul in X-Richtung

<b>Einfluss der Dicke des Probestabs</b>					<b>Zug-E-Modul</b>				
Aus- richtung	Kondi- tion- ierungs- zustand	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	Dicke = 2 mm	Standard- abw.	Dicke = 4 mm	Standard- abw.	proz. Verän- derung
-	-	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
X	lf	1 u. 5	PA 12	SLS	1471,1	62,6	1510,7	49,1	2,7 %
X	lf	1 u. 50	PA 12	SLS	1493,3	51,2	1501,0	45,7	0,5 %
X	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3180,5	48,3	3272,7	27,2	2,9 %
X	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3197,7	77,7	3253,3	32,5	1,7 %
X	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2913,3	38,2	2999,2	342,3	2,9 %
X	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	1752,8	17,9	1850,5	13,0	5,6 %
X	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1768,0	8,4	1864,0	21,7	5,4 %
X	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1716,9	62,0	1884,7	67,1	9,8 %
X	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1661,7	80,27	1784,7	90,5	7,4 %
XY45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2020,3	9,8	2175,6	16,1	7,7 %
XY45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1624,6	57,01	1793,5	45,5	10,4 %
X90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1365,7	32,17	1664,4	71,1	21,9 %
X90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1369,2	71,37	1583,2	63,6	15,6 %

Tabelle 10.27: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Dicke des Probestabs auf den Zug-E-Modul in Y-Richtung

Einfluss der Dicke des Probestabs					Zug-E-Modul				
Aus- richtung	Kondi- tion- ierungs- zustand	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	Dicke = 2 mm	Standard- abw.	Dicke = 4 mm	Standard- abw.	proz. Verän- derung
-	-	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
Y	lf	1 u. 5	PA 12	SLS	1479,2	57,23	1536,4	39,19	3,9 %
Y	lf	1 u. 50	PA 12	SLS	1557,8	116,8	1522,9	37,44	-2,2 %
Y	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3277,9	55,5	3339,5	47,5	1,9 %
Y	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3071,7	409,7	3045,0	243,3	-0,9 %
Y	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3262,2	40,5	3365,9	37,8	3,2 %
Y	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2657,0	174,2	3017,8	140,1	13,6 %
Y	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	1798,9	22,3	1909,1	22,3	6,1 %
Y	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	1497,3	83,1	1645,1	91,3	9,9 %
Y	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1781,8	18,9	1885,9	25,1	5,8 %
Y	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1628,6	58,3	1769,7	58,7	8,7 %
Y	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1545,2	52,5	1764,4	78,9	14,2 %
YZ45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1822,0	29,3	2084,7	19,0	14,4 %
YZ45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1314,2	72,9	1534,2	68,0	16,7 %
Y90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1495,8	71,9	1702,1	72,3	13,8 %
Y90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1350,2	72,5	1688,9	144,4	25,1 %

Tabelle 10.28: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Dicke des Probestabs auf den Zug-E-Modul in Z-Richtung

Einfluss der Dicke des Probestabs					Zug-E-Modul				
Aus- richtung	Kondi- tion- ierungs- zustand	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	Dicke = 2 mm	Standard- abw.	Dicke = 4 mm	Standard- abw.	proz. Verän- derung
-	-	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
Z	lf	1 u. 5	PA 12	SLS	1529,5	55,71	1518,3	6,11	-0,7 %
Z	fl	1 u. 50	PA 12	SLS	1529,7	67,6	1406,7	151,5	-8,0 %
Z	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3214,2	30,2	3365,7	55,9	4,7 %
Z	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	2320,7	299,0	2776,5	154,7	19,6 %
Z	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3185,5	23,1	3419,2	48,0	7,3 %
Z	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2214,3	271,2	2836,4	101,0	28,1 %
Z	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	1546,7	28,1	1788,5	6,9	15,6 %
Z	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	1310,1	77,7	1591,7	127,3	21,5 %
Z	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1594,9	22,3	1767,7	8,2	10,8 %
Z	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1312,9	31,2	1554,6	79,4	18,4 %
XZ45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1904,9	33,5	2021,5	18,5	6,1 %
XZ45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1344,3	44,8	1500,0	190,5	11,6 %
RD45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1923,4	17,5	2058,7	17,9	7,0 %
Z90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1200,1	105,98	1464,0	67,68	22,0 %
Z90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1333,4	66,9	1554,1	157,0	16,5 %

Tabelle 10.29: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Dicke des Probestabs auf den Zug-E-Modul der spritzgegossenen Probestäbe

Einfluss der Dicke des Probestabs					Zug-E-Modul				
Aus- richtung	Kondi- tion- ierungs- zustand	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	Dicke = 2 mm	Standard- abw.	Dicke = 4 mm	Standard- abw.	proz. Verän- derung
-	-	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
0	lf	1 u. 5	PA 12 GK 30	SG	1325,7	59,5	1424,1	52,7	7,4 %
0	lf	1 u. 50	PA 12 GK 30	SG	1343,6	13,7	1368,6	63,1	1,9 %
90	lf	1 u. 5	PA 12 GK 30	SG	1375,7	26,8	1496,0	33,3	8,7 %
90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 30	SG	1369,4	40,0	1510,8	25,3	10,3 %
0	lf	1 u. 5	PA 12 GK 50	SG	2387,5	76,8	2517,9	35,3	5,5 %
0	lf	1 u. 50	PA 12 GK 50	SG	2577,6	28,4	2636,9	18,4	2,3 %
90	lf	1 u. 5	PA 12 GK 50	SG	2651,2	56,2	2626,1	56,0	-0,9 %
90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 50	SG	2558,14	47,6	2518,26	42,3	-1,6 %

Tabelle 10.30: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Zugfestigkeit in X-Richtung

Einfluss der Dicke des Probestabs					Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Kondi- tion- ierungs- zustand	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	Dicke = 2 mm	Standard- abw.	Dicke = 4 mm	Standard- abw.	proz. Verän- derung
-	-	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
X	lf	1 u. 5	PA 12	SLS	41,9	0,7	42,8	0,4	2,1 %
X	lf	1 u. 50	PA 12	SLS	44,6	0,7	45,2	0,6	1,4 %
X	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	42,8	0,6	46,5	0,3	8,6 %
X	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	46,8	0,6	50,2	0,3	7,3 %
X	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	38,3	2,5	40,9	3,1	6,9 %
X	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	24,9	0,4	26,8	0,2	7,6 %
X	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	26,6	0,5	28,0	0,2	5,3 %
X	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	24,9	0,4	25,3	0,4	1,9 %
X	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	22,8	0,4	23,4	0,3	2,6 %
XY45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	26,0	0,2	27,4	0,4	5,4 %
XY45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	21,9	0,4	22,9	0,3	4,6 %
X90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	22,0	0,4	24,2	0,8	9,9 %
X90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	20,0	0,2	22,3	0,2	11,5 %

Tabelle 10.31: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Zugfestigkeit in Y-Richtung

<b>Einfluss der Dicke des Probestabs</b>					<b>Zugfestigkeit</b>				
Aus- richtung	Kondi- tion- ierungs- zustand	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	Dicke = 2 mm	Standard- abw.	Dicke = 4 mm	Standard- abw.	proz. Verän- derung
-	-	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
Y	lf	1 u. 5	PA 12	SLS	42,2	0,8	43,2	0,3	2,3 %
Y	lf	1 u. 50	PA 12	SLS	45,5	0,6	45,6	0,3	0,4 %
Y	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	44,2	0,4	48,5	0,3	9,7 %
Y	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	35,1	2,1	36,4	2,1	3,8 %
Y	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	48,6	0,4	52,5	0,1	8,0 %
Y	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	36,1	2,4	40,4	3,2	12,0 %
Y	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	25,7	0,2	27,6	0,2	7,4 %
Y	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	20,0	0,9	21,3	0,6	6,5 %
Y	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	26,5	0,2	28,3	0,3	6,8 %
Y	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	23,8	0,5	23,8	0,3	-0,4 %
Y	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	21,5	0,3	22,8	0,3	6,0 %
YZ45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	24,0	0,6	26,5	0,2	10,2 %
YZ45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	18,3	0,9	19,8	0,4	8,4 %
Y90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	21,8	1,1	23,8	0,8	9,2 %
Y90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	19,2	0,3	22,3	0,4	16,1 %

Tabelle 10.32: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Zugfestigkeit in Z-Richtung

<b>Einfluss der Dicke des Probestabs</b>					<b>Zugfestigkeit</b>				
Aus- richtung	Kondi- tion- ierungs- zustand	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	Dicke = 2 mm	Standard- abw.	Dicke = 4 mm	Standard- abw.	proz. Verän- derung
-	-	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
Z	lf	1 u. 5	PA 12	SLS	24,88	3,32	18,18	4,23	-26,9 %
Z	fl	1 u. 50	PA 12	SLS	22,94	4,46	17,11	3,50	-25,4 %
Z	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	40,70	0,28	44,00	0,73	8,1 %
Z	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	20,50	3,84	31,86	0,78	55,4 %
Z	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	44,10	1,09	47,90	0,30	8,6 %
Z	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	23,05	4,15	34,69	1,68	50,5 %
Z	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	22,80	0,28	23,50	0,17	3,1 %
Z	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	16,50	0,82	18,80	0,12	13,9 %
Z	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	23,70	0,29	24,30	0,31	2,5 %
Z	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	17,70	0,59	19,80	0,40	11,9 %
XZ45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	24,81	0,24	25,82	0,56	4,1 %
XZ45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	17,95	0,30	20,44	0,37	13,9 %
RD45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	24,62	0,36	26,07	0,41	5,9 %
Z90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	11,90	2,06	17,80	2,63	49,6 %
Z90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	17,33	0,74	20,74	0,30	19,7 %

Tabelle 10.33: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Zugfestigkeit der spritzgegossenen Probestäbe

Einfluss der Dicke des Probestabs					Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Kondi- tion- ierungs- zustand	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	Dicke = 2 mm	Standard- abw.	Dicke = 4 mm	Standard- abw.	proz. Verän- derung
-	-	mm/min			MPa	MPa	MPa	MPa	
0	lf	1 u. 5	PA 12 GK 30	SG	38,0	0,2	39,7	0,1	4,4 %
0	lf	1 u. 50	PA 12 GK 30	SG	41,9	0,3	43,2	0,2	3,1 %
90	lf	1 u. 5	PA 12 GK 30	SG	37,9	0,4	40,2	0,1	5,9 %
90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 30	SG	41,6	40,0	43,7	0,3	4,9 %
0	lf	1 u. 5	PA 12 GK 50	SG	43,5	0,4	45,0	0,4	3,4 %
0	lf	1 u. 50	PA 12 GK 50	SG	49,3	0,5	49,6	0,3	0,5 %
90	lf	1 u. 5	PA 12 GK 50	SG	43,7	0,2	45,2	0,2	3,6 %
90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 50	SG	47,7	0,2	48,9	0,5	2,5 %

Tabelle 10.34: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Dehnung bei Zugfestigkeit in X-Richtung

Einfluss der Dicke des Probestabs					Dehnung bei Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Kondi- tion- ierungs- zustand	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	Dicke = 2 mm	Standard- abw.	Dicke = 4 mm	Standard- abw.	proz. Verän- derung
-	-	mm/min			%	%	%	%	
X	lf	1 u. 5	PA 12	SLS	13,39	1,10	14,51	0,37	8,3 %
X	lf	1 u. 50	PA 12	SLS	10,96	0,61	12,10	0,15	10,4 %
X	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3,06	0,04	3,42	0,03	11,9 %
X	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3,02	0,10	3,35	0,04	10,8 %
X	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3,02	0,09	3,34	0,32	10,6 %
X	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	21,88	1,86	24,34	1,41	11,2 %
X	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	17,27	1,15	18,82	0,52	9,0 %
X	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	15,92	2,76	19,61	3,52	23,2 %
X	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	15,94	3,93	18,41	0,91	15,5 %
XY45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	13,25	1,60	14,88	0,92	12,3 %
XY45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	14,04	3,17	16,93	3,03	20,6 %
X90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	18,84	2,36	19,80	3,11	5,1 %
X90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	13,17	0,78	18,22	1,57	38,3 %

Tabelle 10.35: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Dehnung bei Zugfestigkeit in Y-Richtung

Einfluss der Dicke des Probestabs					Dehnung bei Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Kondi- tion- ierungs- zustand	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	Dicke = 2 mm	Standard- abw.	Dicke = 4 mm	Standard- abw.	proz. Verän- derung
-	-	mm/min			%	%	%	%	
Y	lf	1 u. 5	PA 12	SLS	13,89	0,62	13,69	0,66	-1,4 %
Y	lf	1 u. 50	PA 12	SLS	11,65	0,43	11,18	0,45	-4,1 %
Y	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3,07	0,05	3,63	0,07	18,5 %
Y	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	3,15	0,24	3,66	0,23	16,5 %
Y	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	3,02	0,08	3,45	0,06	14,1 %
Y	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2,81	0,09	3,16	0,09	12,4 %
Y	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	22,60	1,94	25,22	0,62	11,6 %
Y	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	15,30	2,51	19,82	3,13	29,5 %
Y	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	18,01	1,13	16,96	1,19	-5,8 %
Y	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	16,37	2,08	13,60	2,06	-16,9 %
Y	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	12,96	2,26	15,54	2,67	19,9 %
YZ45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	11,58	1,75	15,75	2,57	36,0 %
YZ45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	8,19	1,34	9,37	1,20	14,3 %
Y90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	10,75	1,33	15,31	4,98	42,4 %
Y90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	12,23	0,85	17,63	0,99	44,2 %

Tabelle 10.36: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Dehnung bei Zugfestigkeit in Z-Richtung

Einfluss der Dicke des Probestabs					Dehnung bei Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Kondi- tion- ierungs- zustand	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	Dicke = 2 mm	Standard- abw.	Dicke = 4 mm	Standard- abw.	proz. Verän- derung
-	-	mm/min			%	%	%	%	
Z	lf	1 u. 5	PA 12	SLS	2,07	0,47	1,33	0,36	-35,6 %
Z	fl	1 u. 50	PA 12	SLS	1,56	0,42	1,22	0,19	-21,7 %
Z	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	2,48	0,04	2,70	0,21	8,8 %
Z	sf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	1,77	0,70	2,27	0,25	28,0 %
Z	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	2,32	0,19	2,71	0,02	17,0 %
Z	sf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1,49	0,16	2,17	0,28	46,0 %
Z	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	16,95	2,58	18,55	3,18	9,5 %
Z	lf	1 u. 5	PA 12 GK 40	SLS	9,15	1,52	9,36	1,25	2,2 %
Z	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	15,86	2,22	15,67	1,43	-1,2 %
Z	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	8,30	1,03	8,29	0,99	-0,1 %
XZ45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	13,16	3,95	16,58	2,36	26,0 %
XZ45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	7,28	0,80	10,35	0,80	42,3 %
RD45	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	14,21	1,70	18,45	1,44	29,8 %
Z90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	1,92	0,50	3,88	1,89	101,9 %
Z90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 40	SLS	6,77	0,96	12,25	2,21	80,9 %

Tabelle 10.37: Ergebnisübersicht zum Einfluss der Dicke des Probestabs auf die Dehn. b. Zugf. der spritzgegossenen Probestäbe

Einfluss der Dicke des Probestabs					Dehnung bei Zugfestigkeit				
Aus- richtung	Kondi- tion- ierungs- zustand	Prüf- geschw.	Material	Verar- beitung	Dicke = 2 mm	Standard- abw.	Dicke = 4 mm	Standard- abw.	proz. Verän- derung
-	-	mm/min			%	%	%	%	
0	lf	1 u. 5	PA 12 GK 30	SG	15,3	0,3	14,8	0,3	-3,3 %
0	lf	1 u. 50	PA 12 GK 30	SG	12,5	0,2	12,5	0,1	-0,4 %
90	lf	1 u. 5	PA 12 GK 30	SG	14,7	0,4	14,6	0,1	-0,8 %
90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 30	SG	11,9	0,2	12,2	0,3	3,0 %
0	lf	1 u. 5	PA 12 GK 50	SG	12,1	0,5	11,0	0,8	-8,8 %
0	lf	1 u. 50	PA 12 GK 50	SG	9,4	0,2	8,9	0,1	-5,4 %
90	lf	1 u. 5	PA 12 GK 50	SG	9,5	0,3	11,0	0,3	16,0 %
90	lf	1 u. 50	PA 12 GK 50	SG	7,7	0,2	8,9	0,2	14,9 %

## 10.4 Anhang zu Kapitel 7

### 10.4.1 Anhang zu Abschnitt 7.2



Abbildung 10.6: Spritzgießwerkzeug des Funktionselements der Ausgleichkupplung



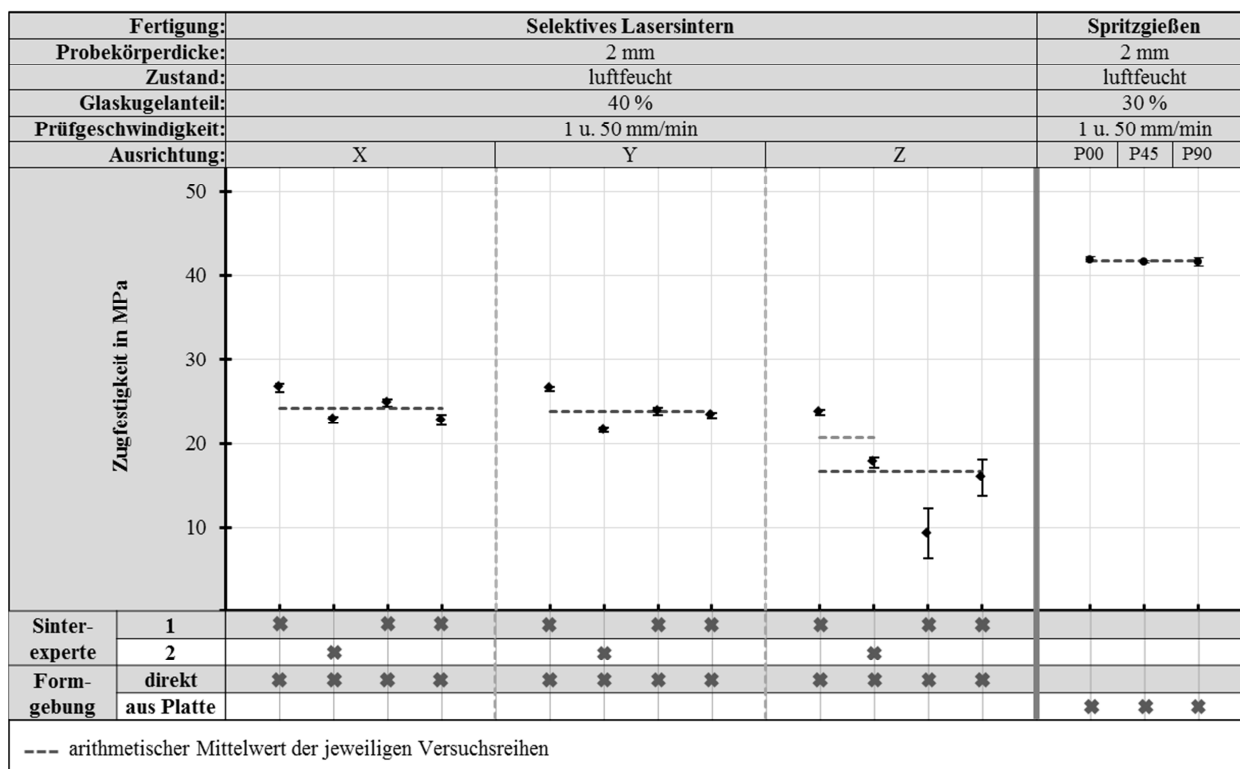


Abbildung 10.7: Zugfestigkeit von lasergesintertem PA 12 GK 40 und spritzgegossenem PA 12 GK 30 im direkten Vergleich; gemessen an 2 mm dicken Probestäben

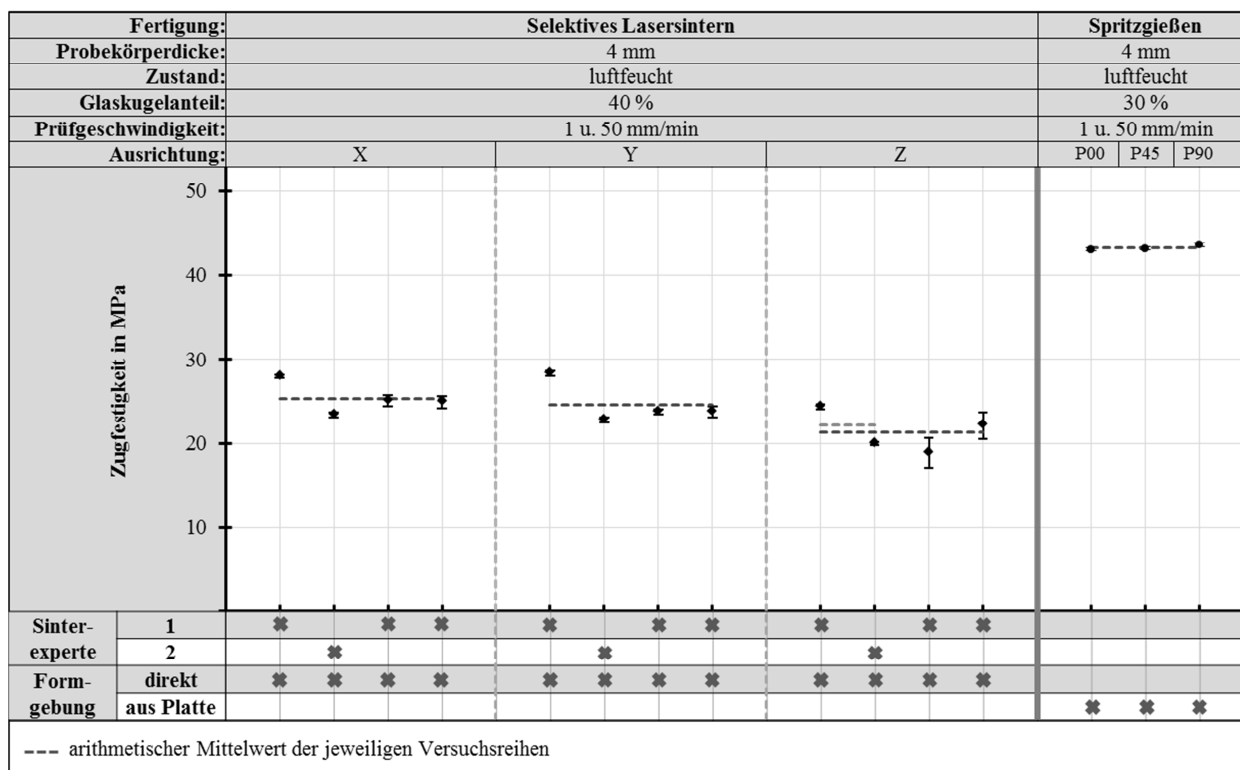


Abbildung 10.8: Zugfestigkeit von lasergesintertem PA 12 GK 40 und spritzgegossenem PA 12 GK 30 im direkten Vergleich; gemessen an 4 mm dicken Probestäben

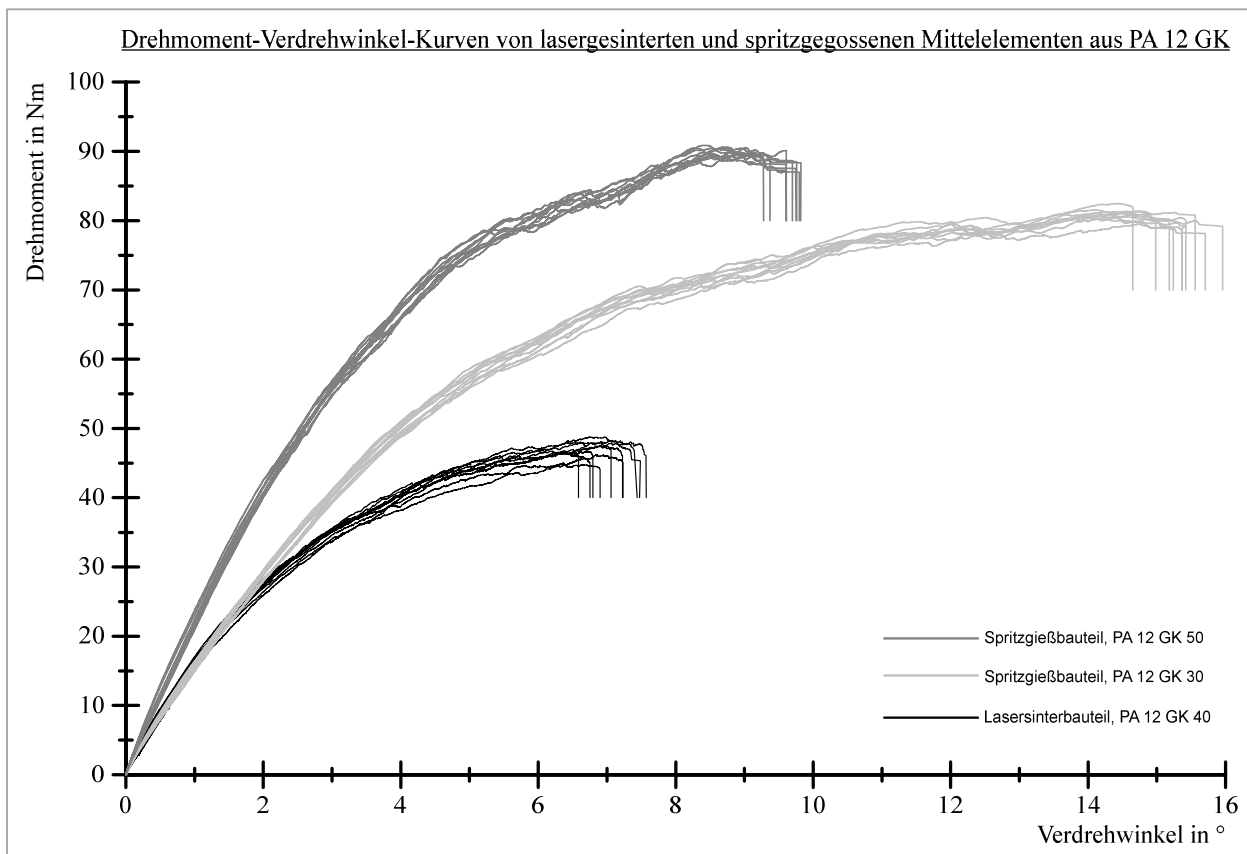


Abbildung 10.9: Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven von lasergesinterten Prototypen aus PA 12 GK 40 und spritzgegossenen Bauteilen aus PA 12 GK 30 sowie PA 12 GK 50

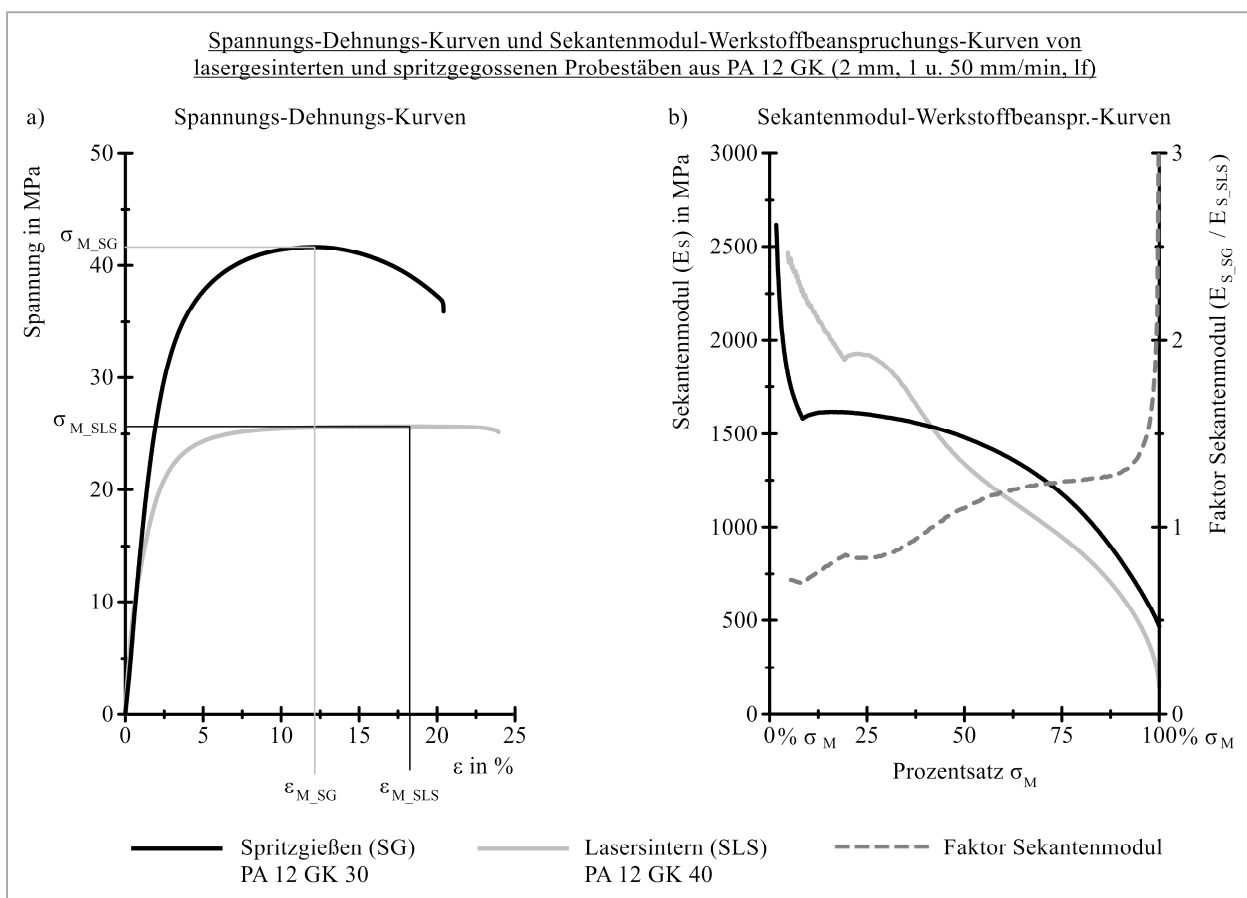


Abbildung 10.10: Spannungs-Dehnungs-Kurven und Sekantenmodul-Werkstoffbeanspruchungs-Kurven von lasergesinterten und spritzgegossenen Probestäben aus PA 12 GK

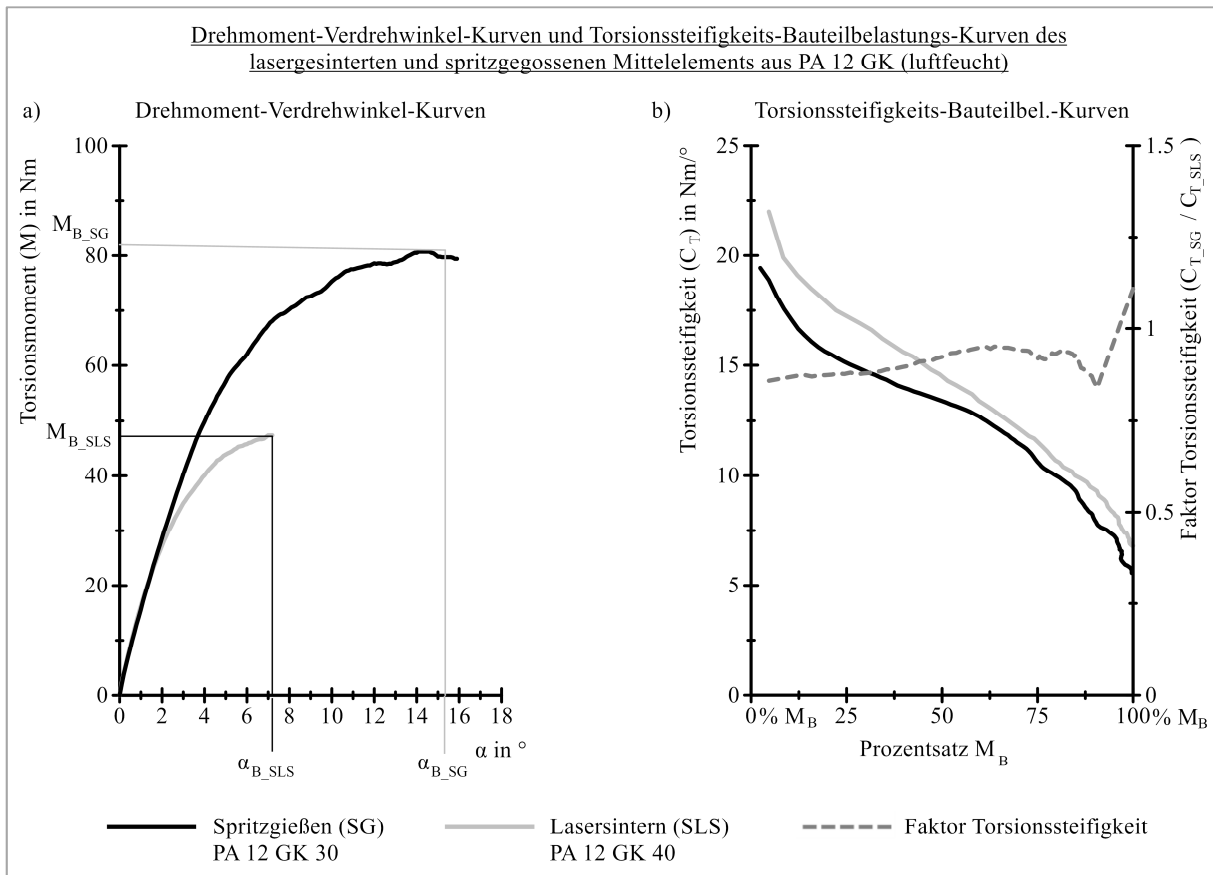


Abbildung 10.11: Drehmoment-Verdrehwinkel-Kurven und Torsionssteifigkeits-Bauteilbelastungs-Kurven des lasergesinterten und spritzgegossenen Mittelelements aus PA 12 GK

#### 10.4.2 Anhang zu Abschnitt 7.3

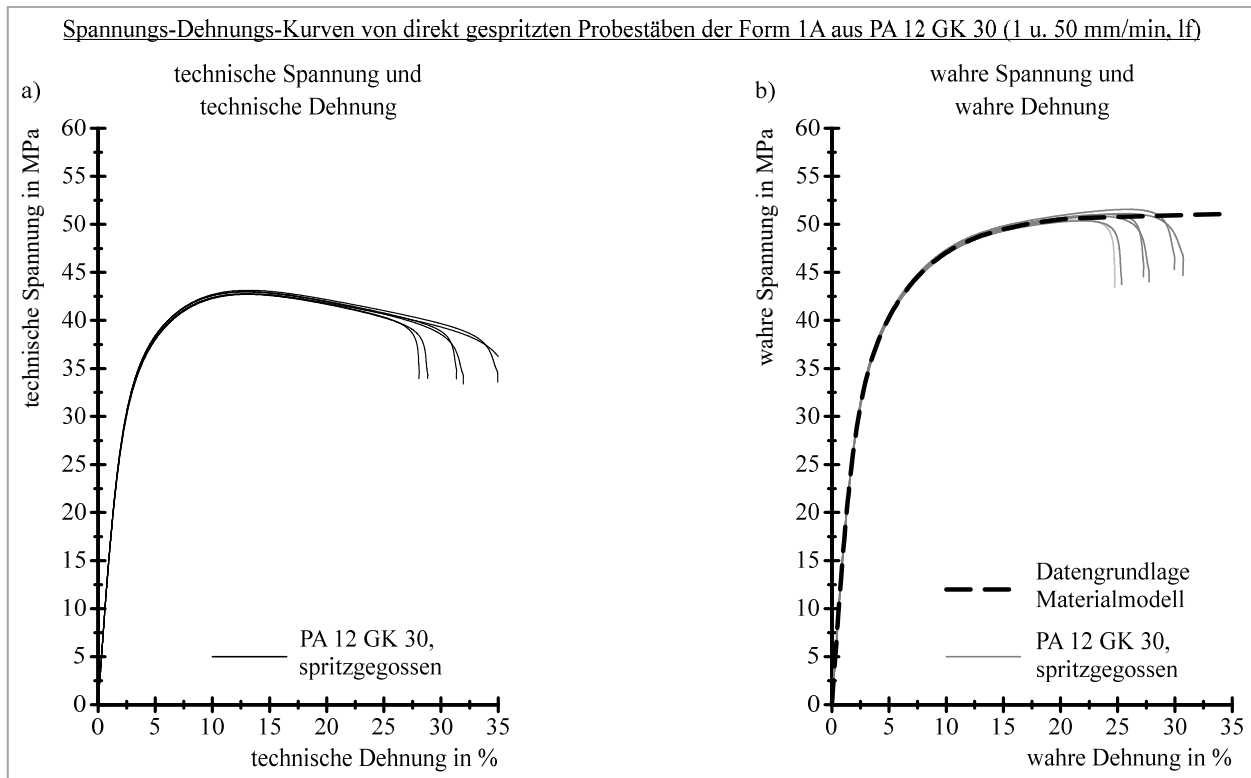


Abbildung 10.12: Datengrundlage zur Erstellung des Materialmodells für das Spritzgussmaterial PA 12 GK 50